Министерство нефтяной и газовой промышленности СССР

ИНСТРУКЦИЯ

ПО ОПРЕДЕЛЕНИЮ ТЕМПЕРАТУРНОГО РЕЖИМА ВЕЧНОМЕРЗЛЫХ И СЕЗОННОМЕРЗЛЫХ ГРУНТОВ И ПРОГНОЗИРОВАНИЮ ПОСЛЕДСТВИЙ ИЗМЕНЕНИЯ ТЕПЛОВЫХ УСЛОВИЙ НА ПОВЕРХНОСТИ

РД 39-Р-088—91

1991

gost.e-ecolog.ru

Министерство нефтяной и газовой промышленности СССР

УТВЕРЖДАЮ

Главный инженер
Главтюменнефтегаза
Ю Н. Вершинин

26 декабря 1990 г.

ИНСТРУКЦИЯ
ПО ОПРЕДЕЛЕНИЮ ТЕМПЕРАТУРНОГО РЕЖИМА ВЕЧНОМЕРЗЛЫХ И СЕЗОННОМЕРЗЛЫХ ГРУНТОВ И ПРОГНОЗИРОВАНИЮ ПОСЛЕДСТВИЙ ИЗМЕНЕНИЯ ТЕПЛОВЫХ УСЛОВИЙ НА ПОВЕРХНОСТИ

РД 39-Р-088—91

Настоящий документ разработан
Государственным научно-исследовательским и проектным институтом нефтяной и газовой промышленности имени В И Муравленко (Гипротюменнефтегазом)

Заместитель директора
по научно-исследовательской работе — *В А Горбатиков*

ОТВЕТСТВЕННЫЕ ИСПОЛНИТЕЛИ

Заведующий научно-исследовательским отделом новой техники и технологии — *Ю С Данизлян*

Младший научный сотрудник — *Б Р Фаттахов*

Заместитель начальника технического отдела по стандартизации и качеству — *С М Петрушенко*

СОГЛАСОВАНО

Начальник управления Главтюменнефтегаза по обустройству месторождений и капитальному строительству — *И А Гуля*

Инструкция по определению температурного режима вечномерзлых и сезонномерзлых грунтов и прогнозированию последствий изменения тепловых условий на поверхности содержит численный и приближенный методы расчета температурного режима.

Цель Инструкции – повышение надежности инженерного прогнозирования теплового состояния грунтов при строительстве сооружений на мерзлых грунтах.

Инструкция предназначена для специалистов, занимающихся проектированием обустройства нефтяных и газовых месторождений.

Авторы: к.т.н. В.А.Горбатиков, к.т.н. Ю.С.Даниэлян, к.г.-м.н. П.А.Яницкий, Б.Р.Фаттахов, Е.А.Кудрявцев, Е.В.Низовцева, В.Н.Галиева.

(С) Государственный научно-исследовательский и проектный институт нефтяной и газовой промышленности имени В.И.Муравленко (Гипротюменнефтегаз), 1991 г.

РУКОВОДЯЩИЙ ДОКУМЕНТ

ИНСТРУКЦИЯ ПО ОПРЕДЕЛЕНИЮ ТЕМПЕРАТУРНОГО РЕЖИМА ВЕЧНОМЕРЗЛЫХ И СЕЗОННОМЕРЗЛЫХ ГРУНТОВ И ПРОГНОЗИРОВАНИЮ ПОСЛЕДСТВИЙ ИЗМЕНЕНИЯ ТЕПЛОВЫХ УСЛОВИЙ НА ПОВЕРХНОСТИ

РД 39-Р-088-91

Вводится впервые

Срок введения установлен с I мая 1991 г.

Срок действия до I мая 1996 г.

I. ОБЩИЕ ПОЛОЖЕНИЯ

I.I. Настоящая Инструкция служит для прогнозирования температурного режима вечномерзлых и сезонномерзлых грунтов при изменении условий теплообмена на поверхности в процессе хозяйственного освоения территории и предназначена для сотрудников проектных и научно-исследовательских институтов, занимающихся проектированием обустройства нефтяных месторождений.

I.2. В Инструкции изложены вывод и обоснование численного метода расчета температурного режима и рассматривается приближенный способ расчета, основанный на методе смены стационарных состояний.

I.3. Цель Инструкции - повышение надежности инженерного прогнозирования теплового состояния грунтов для обеспечения долговечности и эксплуатационной пригодности сооружений на мерзлых грунтах.

I.4. Инструкция позволяет решать задачу прогноза для любых типов грунтов, в том числе и неоднородных по геологическому разрезу. При этом можно оценить влияние таких факторов, как удаление растительного или снежного покрова, определить тенденцию деградации или образования вечной мерзлоты.

2. ЧИСЛЕННЫЙ МЕТОД РАСЧЕТА. ВЫВОД И ОБОСНОВАНИЕ

2.I. Постановка задачи.

2.I.I. Температурное поле грунта при нестационарных условиях теплообмена на поверхности в предположении, что процессы таяния и кристаллизации влаги происходят равномерно в заданном интервале температур от t_* до 0 °С ($t_* > 0$ °С), описывается уравнением теплопроводности

$$c(t)\frac{\partial t}{\partial \tau} = \operatorname{div}(\lambda(t)\,\mathrm{grad}\ t), \qquad (I)$$

где t - температура;

τ - время;

λ - коэффициент теплопроводности;

c - эффективная теплоемкость.

2.I.2. Зависимости $\lambda(t)$ и $c(t)$ определяются следующим образом:

$$\lambda(t) = \begin{cases} \lambda_м, & \text{при } t \le t_*; \\ \lambda_т, & \text{при } t \ge 0; \\ \lambda_т + t(\lambda_м - \lambda_т)/t_*, & \text{при } t_* < t < 0 \end{cases} \qquad (2)$$

$$c(t) = \begin{cases} c_м, & \text{при } t \le t_*; \\ c_т, & \text{при } t \ge 0; \\ c_м + \varkappa, & \text{при } t_* < t < 0. \end{cases} \qquad (3)$$

Через $\lambda_м$ и $\lambda_т$ обозначены коэффициенты теплопроводности, а через $c_м$ и $c_т$ - объемные теплоемкости, соответственно мерзлой и талой породы.

Значение $\varkappa$ определено выражением $\varkappa = q_w/-t_*$, где q_w - расход тепла при фазовых превращениях на единицу объема.

2.2. Вывод уравнения.

2.2.1. Интегрирование уравнения (1) по независимой переменной τ от τ до $\tau+\Delta\tau$ и замена в левой части переменной интегрирования на $t(\tau)$ дают выражение

$$\int_{t(\tau)}^{t(\tau+\Delta\tau)} c(t)dt = \int_{\tau}^{\tau+\Delta\tau} \operatorname{div}(\lambda(t)\operatorname{grad} t)d\tau \qquad (4)$$

2.2.2. Вводя обозначения

$$t^{n+1} = t(\tau+\Delta\tau), \quad t^n = t(\tau), \quad A(t) = \operatorname{div}(\lambda(t)\operatorname{grad} t)$$

и применяя к правой части выражения (4) теорему о среднем, можно записать его в следующем виде:

$$\int_{t^n}^{t^{n+1}} c(t)dt = \Delta\tau\, A(t(\xi)), \qquad (5)$$

где ξ определено в промежутке $\tau \leqslant \xi \leqslant \tau+\Delta\tau$.

2.2.3. Обозначив через I левую часть выражения (5),

$$I = \int_{t^n}^{t^{n+1}} c(t),$$

можно вычислить данный интеграл для всех возможных сочетаний t^n и t^{n+1} с учетом задания функции $c(t)$ согласно (3).

В случае $t^n \leqslant t_*$

при $t^{n+1} \leqslant t_*$ $\quad I = c_м t^{n+1} - c_м t^n, \qquad (6)$

при $t_* < t^{n+1} < 0$ $\quad I = (c_м + \varkappa) t^{n+1} - c_м t^n - \varkappa t_*, \qquad (7)$

при $t^{n+1} \geqslant 0$ $\quad I = c_т t^{n+1} - c_м t^n - \varkappa t_*. \qquad (8)$

В случае $t_* < t_n < 0$

при $t^{n+1} \leqslant t_*$ $\quad I = c_м t^{n+1} - (c_м + \varkappa) t^n + \varkappa t_*, \qquad (9)$

при $t_* < t^{n+1} < 0$ $\quad I = (c_м + \varkappa) t^{n+1} - (c_м + \varkappa) t^n, \qquad (10)$

при $t^{n+1} \geqslant 0$ $\quad I = c_т t^{n+1} - (c_м + \varkappa)\, t^n. \qquad (11)$

В случае $t^n \geqslant 0$

при $t^{n+1} \le t_*$ $I = c_м t^{n+1} - c_т t^n + \varkappa t_*$, (I2)

при $t_* < t^{n+1} < 0$ $I = (c_м + \varkappa) t^{n+1} - c_т t^n$, (I3)

при $t^{n+1} \ge 0$ $I = c_т t^{n+1} - c_т t^n$. (I4)

2.2.4. Полученные выражения (6)-(I4) можно представить одной формулой

$$I = c(t^{n+1}) t^{n+1} - c(t^n) t^n + K \varkappa t_*, \qquad (I5)$$

где K определяется следующим образом:

$$K = \begin{cases} I, & \text{при } t^n > t_*, \ t^{n+1} \le t_*; \\ -I, & \text{при } t^n \le t_*, \ t^{n+1} > t_*; \\ 0, & \text{в остальных случаях.} \end{cases}$$

2.2.5. Пусть Λ - некоторая аппроксимация выражения $A(t(\xi))$, тогда с учетом формулы (I5) уравнение (5) запишется в виде

$$c(t^{n+1}) t^{n+1} - c(t^n) t^n = \Delta\tau \Lambda + K q_w. \qquad (I6)$$

2.3. Некоторые замечания.

2.3.I. Способ решения уравнения (I6) заключается в пошаговом вычислении, начиная с некоторого заданного значения t^0, соответствующего температурному полю в момент времени $\tau = 0$, значений t^1, t^2 и т.д. с заданным шагом $\Delta\tau$.

2.3.2. Отличие полученного выражения (I6) от аналогичных уравнений, использующихся при решении задач теплопроводности, определяется присутствием в правой части данного выражения дополнительного слагаемого $K q_w$ и наличием в левой части коэффициента $c(t^{n+1})$, зависящих от искомой величины t^{n+1}. Однако, согласно определению K и $C(t)$, для их вычисления требуется не точное значение t^{n+1}, а его расположение на температурной шкале относительно величин t_* и 0 °С.

2.4. Способ решения.

Решение уравнения (I6) на каждом шаге перехода от t^n к t^{n+1} осуществляется в три этапа:

I. Вычисление $\tilde{t}$ из уравнения

$$C(t^n)\tilde{t} - C(t^n)t^n = \Delta\tau\Lambda.$$

II. Вычисление $\tilde{t}$ из уравнения

$$\tilde{C}\tilde{t} - C(t^n)t^n = \Delta\tau\Lambda + \tilde{K}q_w,$$

где $\tilde{C}$ и $\tilde{K}$ определены выражениями:

$$\tilde{C} = \begin{cases} C_м + \varkappa, & \text{если } t^n > 0,\ \tilde{t} < 0; \\ C(t^n) + \varkappa, & \text{если } t^n \le t_*,\ \tilde{t} > t_*; \\ C_т, & \text{если } t_* < t^n < 0,\ \tilde{t} > 0; \\ C_м, & \text{если } t_* < t^n < 0,\ \tilde{t} < t_*; \\ C(t^n) & \text{в остальных случаях.} \end{cases}$$

$$\tilde{K} = \begin{cases} \text{I, если } t_* < t^n < 0, & \tilde{t} < t_*; \\ -\text{I, если } t^n \le t_*, & \tilde{t} > t_*; \\ 0 \text{ в остальных случаях} \end{cases}$$

Ш. Вычисление t^{n+1} из уравнения

$$\bar{C}t^{n+1} - C(t^n)t^n = \Delta\tau\Lambda + \bar{K}q_w,$$

где $\bar{C}$ и $\bar{K}$ определены выражениями:

$$\bar{C} = \begin{cases} c_т, & \text{если } t^n \le t_*,\ \tilde{t} > 0; \\ c_м, & \text{если } t^n > 0,\ \tilde{t} < t_*; \\ \tilde{C} & \text{в остальных случаях} \end{cases}$$

$$\bar{K} = \begin{cases} \text{I, если } t^n > 0,\ \tilde{t} < t_*; \\ 0 \text{ в остальных случаях.} \end{cases}$$

2.5. Схема решения одномерной задачи.

2.5.I. Решение рассматриваемой задачи в одномерной постановке используется при прогнозировании температурного режима грунтов в условиях, когда режим теплообмена на поверхности,

геологический разрез грунта, рельеф и т.д. по горизонтали можно считать одинаковыми.

2.5.2. В одномерной постановке уравнение (I) имеет вид

$$C(t)\frac{\partial t}{\partial \tau} = \frac{\partial}{\partial x}\left(\lambda(t)\frac{\partial t}{\partial y}\right), \qquad (17)$$

где y - координата по глубине;

λ - коэффициент теплопроводности, определенный согласно (2);

C - эффективная теплоемкость, определенная согласно (3).

2.5.3. Способ решения уравнения (I7), изложенный в п. 2.4, реализуется по разностной схеме чередующихся направлений.

Согласно этой схеме, каждый шаг перехода от t^n к t^{n+1} осуществляется в два приема. Первый раз от t^n к $t^{n+\frac{1}{2}}$ - с движением по возрастанию индексов узлов разностной сетки, второй раз от $t^{n+\frac{1}{2}}$ к t^{n+1} - по убыванию индексов.

2.5.4. Согласно схеме чередующихся направлений, аппроксимация правой части уравнения (I7) имеет следующий вид.

При первом обходе (по возрастанию индексов)

$$\Lambda_1 = \lambda(t^n_{i+\frac{1}{2}})\frac{t^n_{i+1} - t^n_i}{h_{y_{i+1}}\tilde{h}_{x_i}} + \lambda(t^n_{i-\frac{1}{2}})\frac{t^{n+\frac{1}{2}}_{i-1} - t^{n+\frac{1}{2}}_i}{h_{y_i}\tilde{h}_{x_i}}$$

При втором обходе (по убыванию индексов)

$$\Lambda_2 = \lambda(t^{n+\frac{1}{2}}_{i+\frac{1}{2}})\frac{t^{n+1}_{i+1} - t^{n+1}_i}{h_{y_{i+1}}\tilde{h}_{x_i}} + \lambda(t^{n+\frac{1}{2}}_{i-\frac{1}{2}})\frac{t^{n+\frac{1}{2}}_{i-1} - t^{n+\frac{1}{2}}_i}{h_{y_i}\tilde{h}_{x_i}}.$$

Здесь h_{y_i} - шаги координатной сетки;

t^n_i - значения температуры в узлах сетки;

n - индекс шага по времени;

$t_{i+\frac{1}{2}} = 0{,}5\,(t_i + t_{i\pm1})$;

$\tilde{h}_{y_i} = 0{,}5\,(h_{y_i} + h_{y_{i+1}})$.

2.5.5. Расчетные формулы решения одномерной задачи, согласно способу, изложенному в (4), по схеме чередующихся направлений выглядит следующим образом. На первом полушаге (при переходе от t^n_i к $t^{n+\frac{1}{2}}_i$)

$$\tilde{t} = f/(c(t_i^n)+a_2),$$

$$\bar{t} = (f+\tilde{K}q_w)/(\tilde{c}+a_2),$$

$$t_i^{n+1/2} = (f+\bar{\tilde{K}}q_w)/(\bar{\tilde{c}}+a_2),$$

где $f = c(t_i^n)t_i^n + a_1(t_{i+1}^n - t_i^n)$.

На втором полушаге (при переходе от $t_i^{n+1/2}$ к t_i^{n+1})

$$\tilde{t} = f/(c(t_i^{n+1/2})+a_1),$$

$$\bar{t} = (f+\tilde{K}q_w)/(\tilde{c}+a_1),$$

$$t_i^{n+1} = (f+\bar{\tilde{K}}q_w)/(\bar{\tilde{c}}+a_1),$$

где $f = C(t_i^{n+1/2})t_i^{n+1/2} + a_2(t_{i-1}^{n+1/2} - t_i^{n+1/2})$.

Коэффициенты a_1, a_2 определены выражениями:

$$a_1 = \frac{0{,}5\cdot\Delta\tau\ \lambda(t_{i+1/2}^{\ell})}{h_{w_{i+1}}\ \tilde{h}_{w_i}},$$

$$a_2 = \frac{0{,}5\ \Delta\tau\cdot\lambda(t_{i-1/2}^{\ell})}{h_{w_i}\ \tilde{h}_{w_i}},$$

где $\ell = n$ на первом полушаге и $\ell = n+1/2$ на втором полушаге.

2.6. Схема решения двумерной задачи.

2.6.I. Двумерная постановка задачи используется при расчетах температурного поля грунта, когда необходимо учесть форму рельефа поверхности либо неоднородность грунта по горизонтали и т.д., т.е. в тех случаях, когда нельзя получить решение в рамках одномерной задачи.

2.6.2. Уравнение (I) для двумерного случая имеет вид

$$c(t)\frac{\partial t}{\partial \tau} = \frac{\partial}{\partial x}(\lambda(t)\frac{\partial t}{\partial x}) + \frac{\partial}{\partial y}(\lambda(t)\frac{\partial t}{\partial y}), \qquad (I8)$$

где X - горизонтальная координата;

y - вертикальная координата.

2.6.3. Решение уравнения (I8) осуществляется аналогично п. 2.5.3 методом чередующихся направлений.

2.6.4. Аппроксимация правой части уравнения (I8) по схеме чередующихся направлений имеет следующий вид.

При расчете по возрастанию индексов узлов сетки:

$$\Lambda_1 = \lambda(t^n_{i+\frac{1}{2},j}) \frac{t^n_{i+1,j} - t^n_{i,j}}{h_{x_{i+1}} \tilde{h}_{x_i}} + \lambda(t^n_{i-\frac{1}{2},j}) \frac{t^{n+\frac{1}{2}}_{i-1,j} - t^{n+\frac{1}{2}}_{i,j}}{h_{x_i} \tilde{h}_{x_i}} +$$

$$+ \lambda(t^n_{i,j+\frac{1}{2}}) \frac{t^n_{i,j+1} - t^n_{i,j}}{h_{y_{j+1}} \tilde{h}_{y_j}} + \lambda(t^n_{i,j-\frac{1}{2}}) \frac{t^{n+\frac{1}{2}}_{i,j-1} - t^{n+\frac{1}{2}}_{i,j}}{h_{y_j} \tilde{h}_{y_j}}$$

При расчете по убыванию индексов узлов сетки:

$$\Lambda_2 = \lambda(t^{n+\frac{1}{2}}_{i+\frac{1}{2},j}) \frac{t^{n+1}_{i+1,j} - t^{n+1}_{i,j}}{h_{x_{i+1}} \tilde{h}_{x_i}} + \lambda(t^{n+\frac{1}{2}}_{i-\frac{1}{2},j}) \frac{t^{n+\frac{1}{2}}_{i-1,j} - t^{n+\frac{1}{2}}_{i,j}}{h_{x_i} \tilde{h}_{x_i}} +$$

$$+ \lambda(t^{n+\frac{1}{2}}_{i,j+\frac{1}{2}}) \frac{t^{n+1}_{i,j+1} - t^{n+1}_{i,j}}{h_{y_{j+1}} \tilde{h}_{y_j}} + \lambda(t^{n+\frac{1}{2}}_{i,j-\frac{1}{2}}) \frac{t^{n+\frac{1}{2}}_{i,j-1} - t^{n+\frac{1}{2}}_{i,j}}{h_{y_j} \tilde{h}_{y_j}}$$

Здесь h_{x_i}, h_{y_j} – шаги пространственной сетки;

$t^n_{i,j}$ – значения температуры в узлах сетки;

$t_{i\pm\frac{1}{2},j} = 0{,}5\,(t_{i,j} + t_{i\pm1,j})$;

$t_{i,j\pm\frac{1}{2}} = 0{,}5\,(t_{i,j} + t_{i,j\pm1})$;

$\tilde{h}_{x_i} = 0{,}5\,(h_{x_i} + h_{x_{i+1}})$;

$\tilde{h}_{y_j} = 0{,}5\,(h_{y_j} + h_{y_{j+1}})$;

n – индекс шага по времени.

2.6.5. Расчетные формулы решения двумерной задачи имеют следующий вид.

На первом полушаге (при переходе от $t^n_{i,j}$ к $t^{n+\frac{1}{2}}_{i,j}$):

$$\tilde{t} = f/c(t^n_{i,j}) + a_3 + a_4),$$

$$\tilde{\tilde{t}} = (f + \kappa q_w)/(\tilde{c} + a_3 + a_4),$$

$$t^{n+\frac{1}{2}}_{i,j} = (f + \tilde{\tilde{\kappa}} q_w)/(\tilde{\tilde{c}} + a_3 + a_4),$$

где $f = c(t^n_{i,j})\,t^n_{i,j} + a_1(t^n_{i+1,j} - t^n_{i,j}) + a_2(t^n_{i,j})$

На втором полушаге (при переходе от $t^{n+1/2}_{i,j}$ к $t^{n+1}_{i,j}$).

$$\tilde{\tau} = f/(c(t^{n+1/2}_{i,j}) + a_1 + a_2),$$

$$\tilde{\tilde{\tau}} = (f + \tilde{K} q_w)/(\tilde{c} + a_1 + a_2),$$

$$t^{n+1}_{i,j} = (f + \tilde{\tilde{K}} q_w)/(\tilde{\tilde{c}} + a_1 + a_2),$$

где $f = \dot{c}(t^{n+1/2}_{i,j})\,t^{n+1/2}_{i,j} + a_3(t^{n+1/2}_{i-1,j} - t^{n+1/2}_{i,j}) + a_4(t^{n+1/2}_{i,j-1} - t^{n+1/2}_{i,j})$

Коэффициенты a_i определены выражениями:

$$a_1 = \frac{0{,}5 \cdot \Delta\tau\ \lambda(t^{\ell}_{i+1/2,j})}{h_{x_{i+1}}\ \tilde{h}_{x_i}},$$

$$a_2 = \frac{0{,}5 \cdot \Delta\tau \cdot \lambda(t^{\ell}_{i,j+1/2})}{h_{y_{j+1}} \cdot \tilde{h}_{y_j}},$$

$$a_3 = \frac{0{,}5 \cdot \Delta\tau \cdot \lambda(t^{\ell}_{i-1/2,j})}{h_{x_i}\ \tilde{h}_{x_i}},$$

$$a_4 = \frac{0{,}5 \cdot \Delta\tau\ \lambda(t^{\ell}_{i,j-1/2})}{h_{y_j} \cdot \tilde{h}_{y_j}},$$

где $\ell = n$ на первом полушаге и $\ell = n + 1/2$ на втором полушаге.

2.7. Контроль точности решения.

Для контроля точности получаемого решения определяется погрешность δ путем вычисления интегрального баланса тепла

$$\delta = \frac{|Q_1 - Q_2|}{|Q_1|}.$$

Вычисление Q_1 и Q_2 производится по формулам:

$$Q_1 = \int_0^{y_1} \int_0^{t(\tau_1)} c(t)\,dt\,dy,$$

I. Для одномерного случая

$$Q_1 = \int_0^{y_1} \int_0^{t(\tau_1)} c(t)\, dt dy,$$

$$Q_2 = \int_0^{\tau_1} \lambda \left.\frac{\partial t}{\partial y}\right|_{y=0} d\tau,$$

где y_1 – расчетная глубина;

τ_1 – расчетный период.

2. Для двумерного случая

$$Q_1 = \iint_S \int_0^{t(\tau_1)} dt\, ds,$$

$$Q_2 = \int_0^{\tau_1} \int_G \lambda \frac{dt}{dn}\, dG\, d\tau,$$

где S – расчетная область,

G – граница области;

n – нормаль к границе;

τ_1 – расчетный период.

2.8. Поверхностные условия.

2.8.I. Температура воздуха задается в виде двух отрезков синусоид, определенных формулами:

$$t_B = t_{min} \cdot \sin(\omega_1 \tau_s), \qquad \text{если } \tau_s < \tau_p,$$

$$t_B = t_{max} \cdot \sin(\omega_2 (\tau_s - t_p)), \qquad \text{если } \tau_s \geq \tau_p,$$

где t_B – температура воздуха;

t_{min} – минимальная температура воздуха в зимний период;

t_{max} – максимальная температура воздуха в летний период;

$\omega_1 = \pi / \tau_p$;

$\omega_2 = \pi / (\tau_g - \tau_p)$;

τ_g – длительность годового цикла;

τ_p – длительность периода с отрицательной температурой воздуха;

$\tau_в$ - время, отсчитываемое от осенней даты перехода температуры воздуха через 0 °С.

2.8.2. Граничное условие записывается в виде

$$\lambda \frac{\partial t}{\partial n} = \alpha (t - t_в);$$

$$\alpha = \begin{cases} \alpha_1, & \text{при } t_в < 0; \\ \alpha_2, & \text{при } t_в \geq 0, \end{cases}$$

где n - нормаль к границе расчетной области;

α_1 - коэффициент теплоотдачи с поверхности в зимний период;

α_2 - коэффициент теплоотдачи с поверхности в летний период.

2.9. Замечания по реализации.

Примеры расчетных областей для одномерного и двумерного случаев с граничными условиями показаны на рис. I,2.

Тексты программ и пример расчета приведены в приложениях I, 2, 3.

Для реализации программы расчета одномерной задачи на персональном компьютере использован язык Turbo Pascal 5.0. Двумерная задача реализована на языке Turbo C 2.0 для персонального компьютера и на PL/1 для вычислительной машины ЕС 1055.

Время, необходимое для решения одномерной задачи на компьютере типа IBM PC AT, составляет в среднем 15-20 мин., для двумерной задачи на ЕС 1055 - приблизительно I час.

3. ПРИБЛИЖЕННЫЙ МЕТОД РАСЧЕТА ТЕМПЕРАТУРНОГО РЕЖИМА ГРУНТА

3.1. Общее описание.

Приводится приближенная методика расчета, основанная на методе смены стационарных состояний и учитывающая такие факторы, как изменение температуры воздуха в течение года, неоднородность грунта, наличие фазовых переходов влаги, теплоизоляционный эф-

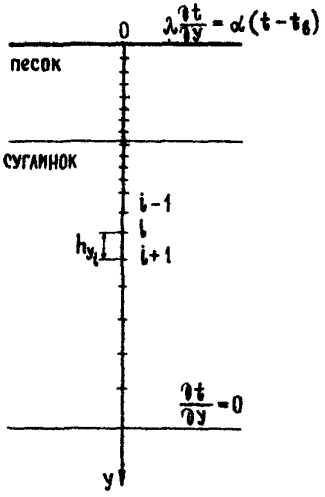

Рис. I. Расчетная область для одномерной задачи

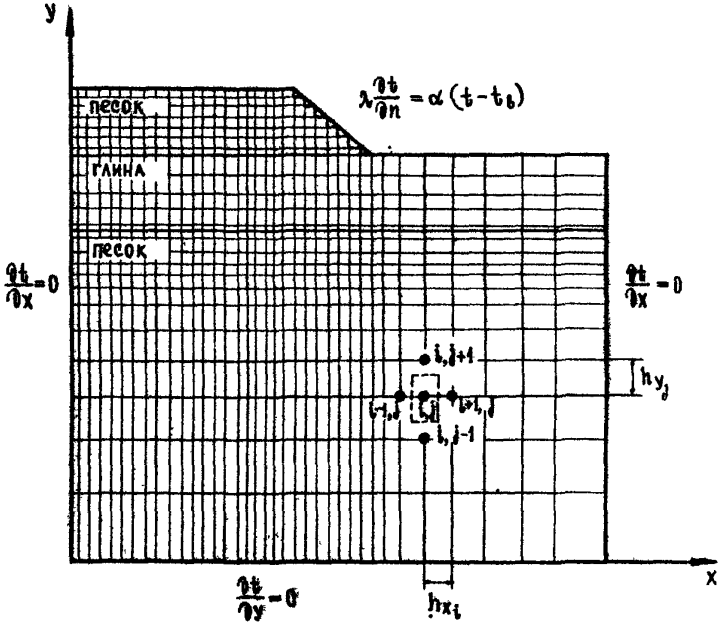

Рис. 2. Расчетная область для двумерной задачи

фект снежного покрова.

Рассматривается грунт, состоящий из двух параллельных слоев с различными теплофизическими свойствами:

Решение представлено в аналитическом виде с изменением реальных ситуаций, возникающих при изменении внешних параметров.

3.2. Безразмерные параметры и переменные.

3.2.I. Вводятся следующие безразмерные параметры, которые полностью определяют исследуемый процесс:

I. $\gamma = \frac{T_A \lambda_1 t_r}{\varkappa_1 H^2}$ – безразмерный параметр.

2. $\varkappa_{12} = \frac{\varkappa_1}{\varkappa_2}$ – относительная теплота фазового перехода.

3. $\lambda_{21} = \frac{\lambda_2}{\lambda_1}$ – относительная теплопроводность.

4. $Bi = \frac{\lambda_{сн} H}{H_{сн} \lambda_1}$ – коэффициент Био.

5. $\vartheta_c = \frac{T_c}{T_A}$ – среднегодовая температура воздуха.

Здесь

T_A – амплитуда сезонных колебаний температуры воздуха, ^oC;

λ_1 – коэффициент теплопроводности первого слоя, Вт/(м·К);

t_r – продолжительность года = 8760 ч;

$\varkappa_1$ – теплота фазового перехода первого (верхнего) слоя, Дж/кг;

H – толщина верхного слоя, м;

T_c – среднегодовая температура воздуха, ^oC;

$\varkappa_2$ – теплота фазового перехода второго (нижнего) слоя, Дж/кг;

λ_2 – коэффициент теплопроводности второго слоя, Вт/(м·К);

$\lambda_{сн}$ – коэффициент теплопроводности снега, Вт/(м·К);

$H_{сн}$ – толщина снега, м.

3.2.2. Расчетная схема представлена на рис. 3.

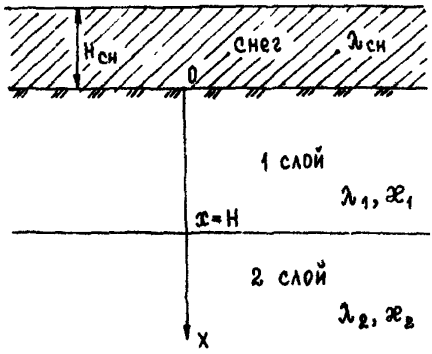

Рис. 3. Расчетная схема

3.2.3. Вводятся также безразмерные переменные:

$$Q=\frac{T}{T_A},\quad \xi=\frac{x}{H},\quad \tau=\frac{t}{t_г},\quad \Theta_{min}=\frac{T_{min}}{T_A},$$

где T - температура грунта, ^{o}C;

T_{min} - минимальная температура грунта на заданной глубине;

X - линейная координата, м;

t - время, ч.

3.3. Изменение температуры воздуха.

Безразмерная температура воздуха и ее производная имеют вид (рис. 4):

$$\Theta_в(\tau)=\sin(2\pi\tau)+\Theta_c,$$

$$\Theta_в'(\tau)=2\pi\cos(2\pi\tau),$$

$\tau_н$ - время начала промерзания, $\tau_к$ - время окончания промерзания, $\tau_{ср}=(\tau_н+\tau_к)/2$.

Минимальная температура T_{min} в любой внутренней точке

грунта достигается при $\tau > \tau_{ср}$. В дальнейшем при определении T_{min} исследуется только эта область, где

$$\theta'_в(\tau) > 0 .$$

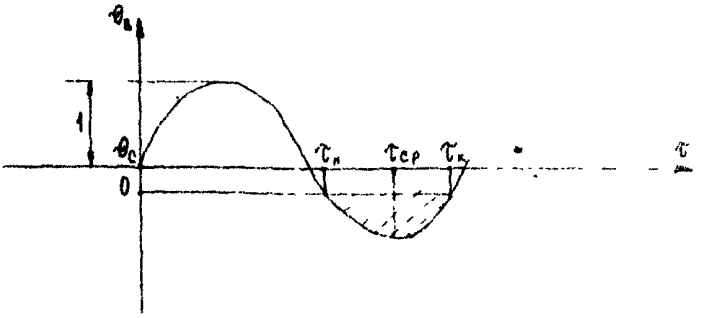

Рис. 4. Изменение температуры воздуха в течение одного года

3.4. Вычисление значений температур.

3.4.1. В случае, когда фронт промерзания находится в первой зоне (рис. 5), равенство тепловых потоков в точке $\xi = 0$ приводит к условию

$$(\theta_в - \theta_1^*) \cdot Bi = \theta_1^* / \xi_{\varphi 1}$$

или

$$\theta_1^* = \frac{\theta_в \cdot Bi \ \xi_{\varphi 1}}{1 + Bi \cdot \xi_{\varphi 1}} .$$

Для произвольной точки $0 < \xi <$ I выполняется соотношение

$$\frac{\theta_1^*}{\theta_1^* - \theta_1} = \frac{\xi_{\varphi 1}}{\xi} .$$

Из этого следует

$$\theta_1(\xi, \tau) = \begin{cases} \theta_в(\tau) \dfrac{Bi(\xi_{\varphi 1} - \xi)}{1 + Bi \cdot \xi_{\varphi 1}}, & \text{при} \quad \xi < \xi_{\varphi 1} , \\ 0 , & \text{при} \quad \xi > \xi_{\varphi 1} . \end{cases}$$

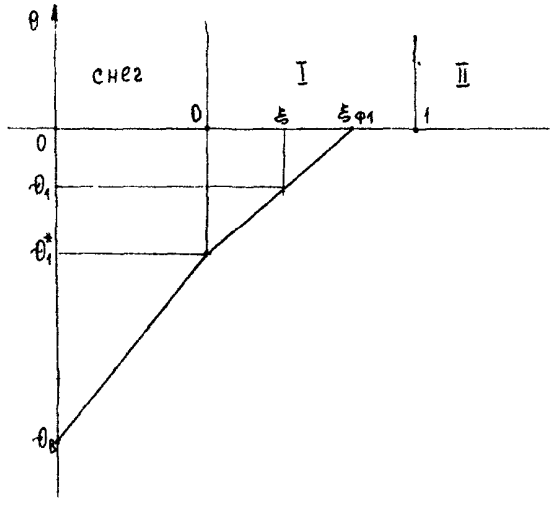

Рис. 5. Расчетная схема к определению температуры грунта в случае, когда фронт промерзания находится в первой зоне

3.4.2. В случае, когда фронт промерзания находится во второй зоне (рис. 6), из соотношения

$$Bi(\theta_в - \theta_1^*) = \theta_1^* - \theta_2^* = \lambda_{21}\frac{\theta_2^*}{\xi_{\varphi 2} - 1}$$

значения температур в точках $\xi = 0$, $\xi = I$ определяются выражениями:

$$\theta_1^* = \theta_в \frac{Bi(\xi_{\varphi 2} - 1 + \lambda_{21})}{Bi(\xi_{\varphi 2} - 1) + \lambda_{21}(1 + Bi)},$$

$$\theta_2^* = \theta_в \frac{Bi(\xi_{\varphi 2} - 1)}{Bi(\xi_{\varphi 2} - 1) + \lambda_{21}(1 + Bi)}.$$

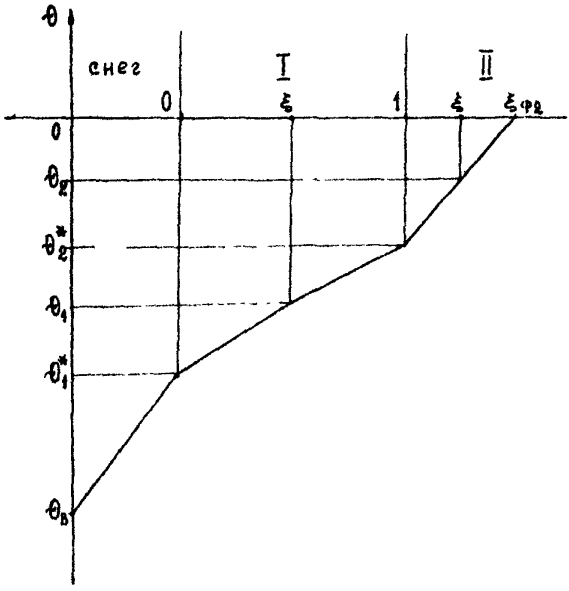

Рис. 6. Расчетная схема к определению температуры грунта в случае, когда фронт промерзания находится во второй зоне

Для произвольной точки возможны два варианта: I - точка находится в первой зоне ($\xi < 1$); 2 - точка находится во второй зоне ($\xi > 1$).

В первом варианте из соотношения

$$\frac{\vartheta_1^* - \vartheta_2^*}{\vartheta_1^* - \vartheta_1} = \frac{1}{\xi}$$

следует

$$\vartheta_1(\xi,\tau) = \vartheta_B Bi \frac{\xi_{\varphi 2} - 1 + \lambda_{21}(1-\xi)}{Bi(\xi_{\varphi 2} - 1) + \lambda_{21}(1+Bi)}.$$

Во втором варианте из соотношения

$$\frac{\vartheta_2}{\vartheta_2^*} = \frac{\xi_{\varphi 2} - \xi}{\xi_{\varphi 2} - 1}$$

следует

$$\vartheta_2(\xi,\tau) = \begin{cases} \vartheta_B Bi \dfrac{\xi_{\varphi 2} - \xi}{Bi(\xi_{\varphi 2} - 1) + \lambda_{21}(1+Bi)}, & \text{при } \xi < \xi_{\varphi 2}; \\ 0, & \text{при } \xi > \xi_{\varphi 2}. \end{cases}$$

3.5. Определение глубины промерзания.

3.5.I. Для первой зоны зависимость координаты фронта промерзания от времени задается уравнением

$$\frac{d\xi_{\varphi 1}}{d\tau} = -\gamma \frac{\vartheta_1^*}{\xi_{\varphi 1}} = -\gamma \frac{\vartheta_B Bi}{1 + Bi\,\xi_{\varphi 1}}$$

с начальным условием

$$\xi_{\varphi 1}\Big|_{\tau = \tau_{CH}} = 0.$$

Решение этого уравнения имеет вид

$$\xi_{\varphi 1}(\tau) = -\frac{1}{Bi} + \sqrt{\frac{1}{Bi^2} + 2\gamma\left[\frac{\cos(2\pi\tau) - \cos(2\pi\tau_H)}{2\pi} - (\tau - \tau_H)\vartheta_C\right]}.$$

3.5.2. Для второй зоны зависимость координаты фронта промерзания от времени задается уравнением

$$\frac{d\,\xi_{\varphi 2}}{d\,\tau} = -\gamma_1 \frac{\theta_2^*}{\xi_{\varphi 2} - 1},$$

где $\gamma_1 = \gamma \frac{\varkappa_1 \lambda_2}{\varkappa_2 \lambda_1}$,

с начальным условием $\xi_{\varphi 2}\big|_{\tau = \tau_*} = 1$.

Решение этого уравнения имеет вид

$$\xi_{\varphi 2}(\tau) = -a + \sqrt{(a+1)^2 + \frac{\gamma_1}{\pi}\left(\cos(2\pi\tau) - \cos(2\pi\tau_*) - 2\gamma_1(\tau - \tau_*)\theta_c\right)},$$

где τ_* – время достижения фронтом промерзания $\xi_{\varphi 1}(\tau)$ точки

$\xi = 1$, $\quad a = \lambda_{21}(1 + 1/Bi) - 1$.

3.5.3. Время достижения фронтом промерзания точки $\xi = 1$ определяется из уравнения

$$1 = -1/Bi + \sqrt{1/Bi^2 + 2\gamma\left[\frac{\cos(2\pi\tau_*) - \cos(2\pi\tau_н)}{2\pi} - \theta_c(\tau_* - \tau_н)\right]},$$

которое приводится к виду

$$\cos(2\pi\tau_*) - 2\pi\theta_c\tau_* = q,$$

где $q = \frac{\pi}{\gamma}\left(\frac{2}{Bi} + 1\right) + \cos(2\pi\tau_н) - 2\pi\theta_c\tau_н$.

Здесь возможны два варианта:

1. $\cos(2\pi\tau_к) - 2\pi\theta_c\tau_к > q$

В этом случае существует единственное решение, удовлетворяющее условию

$$\tau_н < \tau_* < \tau_к,$$

2. $\cos(2\pi\tau_к) - 2\pi\theta_c\tau_к < q$

В данном случае решения не существует, т.е. фронт промерзания не достигает второй зоны.

3.6. Определение минимальных температур.

3.6.I. Задача нахождения минимальной температуры в любой заданной точке заключается в нахождении экстремума функций $\vartheta_1(\xi,t)$, $\vartheta_2(\xi,t)$, определенных в пп. 3.4.I., 3.4.2. Необходимо рассмотреть два варианта:

I - фронт промерзания находится в первой зоне;

2 - начиная с момента времени τ_* начинается промерзание и второго слоя.

3.6.2. В первом варианте условие экстремума $\frac{\partial\vartheta_1}{\partial\tau} = 0$ приводит к уравнению

$$\vartheta_b'(\xi_{\varphi 1}\cdot Bi+1)^2(\xi_{\varphi 1}-\xi)-\vartheta_b^2\gamma(\xi\cdot Bi+1)Bi=0$$

Из этого уравнения для каждого фиксированного значения ξ находится единственное значение $\tau=\tau_{min}$. Точка ξ_1 , в которой достигается минимум в заданный момент времени, определяется по формуле

$$\xi_1=\frac{\vartheta_b'(\xi_{\varphi 1}Bi+1)^2\xi_{\varphi 1}-\vartheta_b^2\gamma Bi}{\vartheta_b'(\xi_{\varphi 1}Bi+1)^2+\vartheta_b^2\gamma Bi^2}$$

3.6.3. Во втором варианте условие $\frac{\partial\vartheta_1}{\partial\tau} = 0$ сводится к уравнению

$$\vartheta_b'\left[\lambda_{21}(1-\xi)+\xi_{\varphi 2}-1\right]\left[\lambda_{21}(1+Bi)+Bi(\xi_{\varphi 2}-1)\right]^2=$$

$$=\gamma_1 Bi\,\vartheta_b^2\lambda_{21}(1+Bi\cdot\xi).$$

Точка ξ_2 , в которой достигается минимум в заданный момент

времени, вычисляется по формуле

$$\xi_2 = \frac{\theta_b'(\lambda_{21}+\xi_{\varphi 2}-1)\left[\lambda_{21}(1+Bi)+Bi(\xi_{\varphi 2}-1)\right]^2-\gamma_1 Bi\,\theta_b^2\lambda_{21}}{\theta_b'\lambda_{21}\left[\lambda_{21}(1+Bi)+Bi(\xi_{\varphi 2}-1)\right]^2+\lambda_{21}\gamma_1 Bi^3\theta_b^2}.$$

Условие экстремума $\frac{\partial\theta_2}{\partial\tau} = 0$ приводит к уравнению

$$\theta_b'(\xi_{\varphi 2}-\xi)\left[\lambda_{21}(1+Bi)+Bi(\xi_{\varphi 2}-1)\right]^2-$$

$$-\gamma_1 Bi\,\theta_b^2\left[\lambda_{21}(1+Bi)+Bi(\xi-1)\right]=0,$$

из которого для фиксированного ξ определяется $\tau=\tau_{min}$, соответствующее минимальному значению.

ПРИЛОЖЕНИЕ 1
Обязательное

ТЕКСТ ПРОГРАММЫ РЕШЕНИЯ ОДНОМЕРНОЙ ЗАДАЧИ

```
PROGRAM pole.
USES
  printer.
CONST
  jn1=49. kzon=1; period=365 25.
{
        Используются следующие константы
        ---------------------------------
  jn1   - количество узловых (сеточных) точек + 1
  kzon  - количество грунтовых слоев.
          Например, для геологического разреза типа :
                    песок сухой
                    торф
                    глина
                    песок влажный
           kzon  должен быть равен 4
   period - длина годового цикла в сутках
}
VAR
  Fil1,Fil2·TEXT;
  name1,name2:STRING[14];
  t ARRAY[0..jn1] OF REAL;
  s·ARRAY[0..jn1] OF REAL;
  tmin:ARRAY[0..jn1] OF REAL;
  z.ARRAY[0..jn1] OF REAL;
  ind:ARRAY[0..jn1] OF INTEGER;
  hz:ARRAY[1..jn1] OF REAL;
  hzs·ARRAY[1 .jn1] OF REAL;
  cdel·ARRAY[1 .kzon] OF REAL;
  ct ARRAY[1..kzon] OF REAL.
  cm·ARRAY[1. kzon] OF REAL;
  xlt:ARRAY[1. kzon] OF REAL;
  xlm ARRAY[1 .kzon] OF REAL;
  ww ARRAY[1 .kzon] OF REAL.
  wnzm:ARRAY[1 .kzon] OF REAL;
  rsk:ARRAY[1..kzon] OF REAL;
  tkr·ARRAY[1..kzon] OF REAL.
  xlt1:ARRAY[1..jn1] OF REAL.
  xlm1:ARRAY[1..jn1] OF REAL;
  alfa,alfa1,alfaa,tgod,tmax,tprom,tprint,dtime,dt.REAL;
  tvsr,tvam1,tvam2,tpp,gama,sum2,sum4:REAL;
  nz,j1,j2,j,k,nomer,nomin:INTEGER;
  znam,treal,tmec,tmsch,omega1,omega2,sum1,sum3,sum0 REAL,
  tv,temp,temp1,temp2,ts,pr,sum5,tmax,pr1,pr2:REAL;
  xl1,xl2,vpr1,vpr2,c1,c2,c3,f1,dtc:REAL;
  dtepl,dtepl1,pogr,pogr1,otn,otn1·REAL.
LABEL
  met0,fin:
BEGIN
  WRITELN ('   Введите:   0 - вывод только на экран   '),
  WRITELN ('              1 - одновременно в файл     ');
```

```
READLN  (nomer),
WRITELN (' Требуется вычислять минимальные температуры ?'),
WRITELN ('                0 - нет  '),
WRITELN ('                1 - да   '),
READLN  (nomin),
WRITELN ('   Введите имя файла с набором данных     '),
READLN  (name1);
ASSIGN  (Fil1,name1);
RESET   (Fil1);
IF nomer=1 THEN BEGIN
   WRITELN ('   Введите имя файла для вывода     '),
   READLN  (name2),
   ASSIGN  (Fil2,name2);
   REWRITE (Fil2);
   END;
tvsr:=0;
READ    (Fil1,tmax,tprom,tprint,dtime,alfa1,alfaz),
READ    (Fil1,tnach,tvam1,tvam2,tpp,gama),

WRITELN ('                    ВХОДНАЯ  ИНФОРМАЦИЯ :'),
WRITELN;
WRITELN ('Обозначение                              Физический
              Единица  Принятое'),
WRITELN ('в программе                                  смысл
            измерения  значение');
WRITELN;
WRITELN ('       tmax                    Расчетный  период
                год',tmax:10:2);
WRITELN ('      tprom                Когда начать печать
                год',tprom:10:2),
WRITELN ('     tprint                      Частота печати
                месяц',tprint:10:2);
WRITELN ('      dtime                      Шаг по времени
                час',dtime:10:2);
WRITELN ('      alfa1     Коэффициент теплоотдачи летом
      ккал/(м^2*ч*град)',alfa1:10:2);
WRITELN ('      alfaz     Коэффициент теплоотдачи зимой
      ккал/(м^2*ч*град)',alfaz:10:2);
WRITELN ('      tnach      Начальная температура грунта
                град Ц',tnach:10:2);
WRITELN ('      tvam1   Минимальная температура воздуха
                град Ц',tvam1:10:2);
WRITELN ('      tvam2  Максимальная температура воздуха
                град Ц',tvam2:10:2);
WRITELN ('        tpp   Период с темпер-рой воздуха < 0
                 месяц',tpp:10:2);
WRITELN ('       gama            Теплота плавления льда
               ккал/м^3',gama:10:2);
IF nomer=1 THEN BEGIN
   WRITELN (Fil2,'                    ВХОДНАЯ  ИНФОРМАЦИЯ :'),
   WRITELN (Fil2),
   WRITELN (Fil2,'Обозначение
   Физический                         Единица  Принятое');
   WRITELN (Fil2,'в программе
   смысл                      измерения  значение');
   WRITELN (Fil2);
   WRITELN (Fil2,'       tmax
   Расчетный  период                        год',tmax:10:2),
```

```
    WRITELN (Fil2,'      tprom
    Когда начать печать                        год ,tprom 10.2);
    WRITELN (Fil2,'    tprint
    Частота печати                      месяц',tprint 10.2);
    WRITELN (Fil2,'      dtime
    Шаг по времени                        час',dtime 10 2),
    WRITELN (Fil2,'      alfal     Коэффициент
    теплоотдачи летом       ккал/(м^2*ч*град)',alfal 10:2),
    WRITELN (Fil2,'      alfaz     Коэффициент
    теплоотдачи зимой       ккал/(м^2*ч*град)',alfaz 10:2);
    WRITELN (Fil2,'      tnach      Начальная
    температура грунта                  град Ц',tnach:10 2),
    WRITELN (Fil2,'      tvam1   Минимальная
    температура воздуха                 град Ц',tvam1.10:2),
    WRITELN (Fil2,'      tvam2  Максимальная
    температура воздуха                 град Ц',tvam2.10:2),
    WRITELN (Fil2,'        tpp   Период с темпер-рой
    воздуха < 0                        месяц',tpp.10.2),
    WRITELN (Fil2,'       gama             Теплота
    плавления льда                    ккал/м^3',gama:10 2),
    END,
tgod:=period*24,
tmax.:=tmax*tgod;
tprint:=tprint*period*2;
tprom.:=tprom*tgod+tprint,
tpp :=tpp*period*2;
dt:=dtime*0.1,
nz :=jn1-1;
FOR k :=1 TO kzon DO BEGIN
    READ    (Fil1,cm[k],ct[k],xlm[k],xlt[k],ww[k],wnzm[k],
    rsk[k],tkr[k]);
    WRITELN ('     cm[',k:2,']','      Теплоемкость
    мерзлого грунта          ккал/(м^3*град)',cm[k] 10.2);
    WRITELN ('     ct[',k:2,']','       Теплоемкость
    талого грунта          ккал/(м^3*град)',ct[k]:10:2);
    WRITELN ('    xlm[',k 2,']',' Теплопроводность
    мерзлого грунта          ккал/(м*ч*град)',xlm[k] 10:2);
    WRITELN ('    xlt[',k:2,']','    Теплопроводность
    талого грунта          ккал/(м*ч*град)',xlt[k] 10:2),
    WRITELN ('     ww[',k:2,']','       Суммарная
    влажность грунта             доли единицы',ww[k] 10 2);
    WRITELN ('   wnzm[',k:2,']','       Количество
    незамерзшей воды             доли единицы',wnzm[k]:10.2);
    WRITELN ('    rsk[',k:2,']','       Объемный вес
    скелета грунта                 кг/м^3',rsk[k] 10:2);
    WRITELN ('    tkr[',k.2,']',' Нижняя граница фазовых
    переходов                   град Ц',tkr[k].10:2),
    IF nomer=1 THEN BEGIN
       WRITELN (Fil2,'     cm[',k:2,']','      Теплоемкость
       мерзлого грунта ,       ккал/(м^3*град)',cm[k] 10.2),
       WRITELN (Fil2,' ,   ct[',k:2,']','      Теплоемкость
       талого грунта          ккал/(м^3*град)',ct[k]:10:2);
       WRITELN (Fil2,'    xlm[',k:2,']',' Теплопроводность
        мерзлого грунта       ккал/(м*ч*град)',xlm[k]:10:2);
       WRITELN (Fil2,'    xlt[',k 2,']',' Теплопроводность
        талого грунта          ккал/(м*ч*град)',xlt[k] 10:2);
       WRITELN (Fil2,'     ww[',k:2,']','       Суммарная
       влажность грунта          доли единицы',ww[k]:10 2);
```

```
      WRITELN (Fil2,'   wnzm[',k.2,']','       Количество
      незамерзшей воды        доли единицы',wnzm[k] 10 2),
      WRITELN (Fil2,'   rsk[',k 2,']','       Объемный вес
      скелета грунта                  кг/м^3',rsk[k]:10·2);
      WRITELN (Fil2,'    tkr[',k:2,']',' Нижняя граница
      фазовых переходов               град Ц',tkr[k]·10·2),
      END;
    END;
WRITELN.
WRITELN ('     Шаги по сетке  (от поверхности к глубине) '),
WRITELN;
IF nomer=1 THEN BEGIN
   WRITELN(Fil2);
   WRITELN (Fil2,'        Шаги по сетке
   (от поверхности к глубине) ');
   WRITELN (Fil2);
   END;
hz[1]:=0;
z[1]:=0;
FOR j:=2 TO nz DO BEGIN
    READ  (Fil1,hz[j]),
    WRITE ('      hz[',j:3,']=',hz[j]:6:3);
    IF nomer=1 THEN WRITE (Fil2,
    '      hz[',j 3,']=',hz[j]:6:3);
    IF NOT(ODD(j-1)) THEN k:=TRUNC((j-1)/2) ELSE k:=1;
    IF (nomer=1) AND NOT((ODD(k))) THEN  WRITELN (Fil2);
    z[j]:=z[j-1]+hz[j];
    END;
hz[jn1]·=0,
WRITELN,
IF nomer=1 THEN WRITELN(Fil2);
FOR j:=1 TO nz DO
    ind[j]:=1;
WHILE 1=1 DO BEGIN
    READ (Fil1,k);
    IF k=0 THEN GOTO fin;
    READ (Fil1,j1,j2),
    FOR j:=j1 TO j2 DO
       ind[j]:=k;
    END;
fin:
FOR j:=1 TO nz DO BEGIN
    xlt1[j]·=0 5*(xlt[ind[j]]+xlt[ind[j+1]]);
    xlm1[j]:=0.5*(xlm[ind[j]]+xlm[ind[j+1]]);
    END;
WRITELN;
WRITELN (' Условная схема геологического разреза грунта'),
WRITELN;
IF nomer=1 THEN BEGIN
   WRITELN (Fil2);
   WRITELN (Fil2,' Условная схема геологического разреза
   грунта');
   WRITELN (Fil2);
   END,
FOR j.=1 TO nz DO BEGIN
    WRITE (ind[j]·1);
    IF nomer=1 THEN WRITE (Fil2,ind[j]:1);
    END,
```

```
WRITELN,
IF nomer=1 THEN WRITELN(F112);
FOR k:=1 TO kzon DO
    cdel[k]:=gama*rsk[k]*(wnzm[k]-ww[k])/tkr[k],
{
tnach:=tvsr+2*(tvam1*tpp/tgod+tvam2*(1-tpp/tgod))/pi;
}
FOR j:=0 TO jn1 DO BEGIN
    t[j]:=tnach;
    s[j]:=tnach,
    tmin[j]:=tnach,
    END,
FOR j :=1 TO nz DO
    hzs[j]:=0.5*(hz[j]+hz[j+1]);
omega1:=pi/tpp,
omega2:=pi/(tgod-tpp);
sum0 :=0;
sum1:=0;
sum3 :=0;
FOR j:=2 TO nz DO BEGIN
    temp :=t[j];
    tz :=tkr[ind[j]];
    IF temp>=0 THEN pr:=ct[ind[j]]*temp,
    IF (temp>=tz) AND (temp<0) THEN
       pr:=(cm[ind[j]]+cdel[ind[j]])*temp;
    IF temp<=tz THEN pr :=cm[ind[j]]*temp+tz*cdel[ind[j]];
    pr :=pr*hzs[j],
    sum3:=sum3+pr;
    END,
sum5:=sum3,
tsez :=0,
treal:=0;
met0:       IF treal>=(dtime-0 5*dt) THEN dt:=dtime,
treal :=treal+0 5*dt;
tsez:=tsez+0 5*dt;
IF tsez>tgod THEN tsez:=tsez-tgod;

IF tsez<tpp  THEN tv:=tvsr+tvam1*sin(omega1*tsez)
             ELSE tv:=tvsr+tvam2*sin(omega2*(tsez-tpp));
s[0] :=tv,
FOR j:=1 TO nz DO BEGIN
    temp :=0.5*(t[j]+t[j+1]),
    tz :=0.5*(tkr[ind[j]]+tkr[ind[j+1]]);
    IF temp>=0 THEN xl1:=xlt1[j],
    IF temp<=tz THEN xl1:=xlm1[j],
    IF (temp>tz) AND (temp<0) THEN
    xl1:=xlt1[j]+(xlm1[j]-xlt1[j])*(temp/tz);
    temp :=0 5*(t[j]+t[j-1]);
    tz :=0 5*(tkr[ind[j]]+tkr[ind[j-1]]);
    IF temp>=0 THEN xl2 :=xlt1[j-1];
    IF temp<=tz THEN xl2 :=xlm1[j-1];
    IF (temp>tz) AND (temp<0) THEN
    xl2:=xlt1[j-1]+(xlm1[j-1]-xlt1[j-1])*(temp/tz);
    temp :=t[j];
    tz :=tkr[ind[j]],
    IF temp>=0 THEN c1:=ct[ind[j]];
    IF temp<=tz THEN c1:=cm[ind[j]];
    IF (temp>tz) AND (temp<0) THEN
```

```
      c1 =cm[ind[j]]+cdel[ind[j]];
    dtc =0 5*dt,
    IF j<nz THEN pr1 =xl1/hz[j+1];
    IF j=nz THEN pr1 =0,
    IF j=1  THEN pr2 =alfa;
    IF j>1  THEN pr2 =xl2/hz[j];
    vpr1:=(dtc*pr1)/hzs[j];
    vpr2:=(dtc*pr2)/hzs[j];
    fi:=c1*temp+vpr1*(t[j+1]-temp)+vpr2*s[j-1];
    temp1:=fi/(c1+vpr2),
    c2:=c1,
    IF (temp>=0) AND (temp1<0) THEN
       c2 =cm[ind[j]]+cdel[ind[j]];
    IF (temp<=tz) AND (temp1>tz) THEN
       c2:=c1+cdel[ind[j]];
    IF (temp>tz) AND (temp<0) AND (temp1>0) THEN
       c2:=ct[ind[j]];
    IF (temp>tz) AND (temp<0) AND (temp1<tz) THEN
       c2 =cm[ind[j]],
    IF (temp<=tz) AND (temp1>tz) THEN
       fi:=fi+tz*cdel[ind[j]];
    IF (temp>tz) AND (temp<0) AND (temp1<tz) THEN
       fi:=fi-tz*cdel[ind[j]];
    znam:=c2+vpr2,
    temp2 =fi/znam;
    c3 =c2,
    IF (temp<=tz) AND (temp2>0) THEN c3:=ct[ind[j]];
    IF (temp>=0) AND (temp2<tz) THEN c3:=cm[ind[j]];
    IF (temp>=0) AND (temp2<=tz) THEN
       fi =fi-tz*cdel[ind[j]];
    znam:=c3+vpr2,
    s[j]:=fi/znam,
    END;
treal:=treal+0 5*dt;
tsez:=tsez+0 5*dt,
IF tsez>tgod THEN tsez =tsez-tgod;

IF tsez<tpp  THEN tv =tvsr+tvam1*sin(omega1*tsez)
             ELSE tv =tvsr+tvam2*sin(omega2*(tsez-tpp));
alfa =alfa1,
IF tv<0 THEN alfa =alfaz,

sum2 =0,
FOR j =nz DOWNTO 1 DO BEGIN
    temp =0 5*(s[j]+s[j+1]);
    tz =0 5*(tkr[ind[j]]+tkr[ind[j+1]]),
    IF temp>=0 THEN xl1:=xlt1[j];
    IF temp<=tz THEN xl1:=xlm1[j];
    IF (temp>tz) AND (temp<0) THEN
       xl1 =xlt1[j]+(xlm1[j]-xlt1[j])*(temp/tz);
    temp =0 5*(s[j]+s[j-1]);
    tz =0 5*(tkr[ind[j]]+tkr[ind[j-1]]);
    IF temp>=0 THEN xl2:=xlt1[j-1];
    IF temp<=tz THEN xl2:=xlm1[j-1];
    IF (temp>tz) AND (temp<0) THEN
    xl2 =xlt1[j-1]+(xlm1[j-1]-xlt1[j-1])*(temp/tz);
    temp =s[j];
    tz =tkr[ind[j]],
```

```
    IF temp>=0 THEN c1.=ct[ind[j]],
    IF temp<=tz THEN c1:=cm[ind[j]],
    IF (temp>tz) AND (temp<0) THEN
       c1 =cm[ind[j]]+cdel[ind[j]],
    dtc =0 5*dt,
    IF j<nz THEN pr1.=xl1/hz[j+1];
    IF j=nz THEN pr1.=0,
    IF j=1  THEN pr2:=alfa;
    IF j>1  THEN pr2 =xl2/hz[j];
    vpr1:=(dtc*pr1)/hzs[j],
    vpr2 =(dtc*pr2)/hzs[j];
    fi.=c1*temp+vpr2*(s[j-1]-temp)+vpr1*t[j+1],
    temp1:=fi/(c1+vpr1);
    c2.=c1,
    IF (temp>=0) AND (temp1<0) THEN
       c2 =cm[ind[j]]+cdel[ind[j]],
    IF (temp<=tz) AND (temp1>tz) THEN
       c2:=c1+cdel[ind[j]],
    IF (temp>tz) AND (temp<0) AND (temp1>0) THFN
       c2:=ct[ind[j]],
    IF (temp>tz) AND (temp<0) AND (temp1<tz) THEN
       c2 =cm[ind[j]];
    IF (temp<=tz) AND (temp1>tz) THEN
       fi =ri+tz*cdel[ind[j]],
    IF (temp>tz) AND (temp<0) AND (temp1<tz) THEN
       fi =fi-tz*cdel[ind[j]],
    znam =c2+vpr1,
    temp2:=fi/znam,
    c3 =c2,
    IF (temp<=tz) AND (temp2>0) THEN c3 =ct[ind[j]],
    IF (temp>=0) AND (temp2<tz) THEN c3 :=cm[ind[j]],
    IF (temp>=0) AND (temp2<=tz) THEN
       fi =fi-tz*cdel[ind[j]],
    znam =c3+vpr1,
    IF j=1 THEN sum2 =sum2+(temp-s[j+1])*pr1,
    t[j] =fi/znam,
    END;
t[0] =tv,
IF nomin=1 THEN  FOR j =1 TO nz DO
   IF t[j]<tmin[j] THEN tmin[j] =t[j],
sum2 =sum2*dt,
sum0 =sum0+sum2,
sum1 =sum1+sum2,
tmec:=treal/(tgod/12),
IF treal>=(tprom-0 5*dt) THFN BEGIN
WRITELN,
tmec =treal/(tgod/12),
WRITELN ('   Время (месяц) =',tmec 8 2),
WRITELN ('   Поле температуры '),
WRITELN ('   Глубина  Темп-ра     Глубина  Темп-ра ',
         '   Глубина  Темп-ра     Глубина  Темп-ра'),
WRITELN ('    (метр)  (гр  Ц)      (метр)  (гр  Ц) ',
         '    (метр)  (гр  Ц)      (метр)  (гр  Ц)'),
WRITELN,
IF nomer=1 THEN BEGIN
   WRITELN(Fil2);
   WRITELN (Fil2,'   Время (месяц) =',tmec 8 2),
   WRITELN (Fil2,'   Поле температуры '),
```

```
   WRITELN (Fil2,'   Глубина  Темп-ра     Глубина  Темп-ра '
                 '   Глубина  Темп-ра     Глубина  Темп-ра'),
   WRITELN (Fil2,'    (метр)  (гр  Ц)      (метр)  (гр  Ц) ',
                 '    (метр)  (гр  Ц)      (метр)  (гр  Ц)'),
   WRITELN(Fil2),
   END,

FOR j =1 TO nz DO BEGIN
    WRITE (' ',z[j] 9 3,'    ',t[j] 5 1,' ');
    IF nomer=1 THEN  WRITE (Fil2,' ',z[j] 9 3,'
       t[j] 5 1,' '),
    IF NOT(ODD(j)) THEN k =TRUNC(j/2) ELSE k:=1,
    IF (nomer=1) AND NOT((ODD(k))) THEN  WRITELN (Fil2),

    END,
WRITELN;
IF nomer=1 THEN WRITELN(Fil2);
IF nomin=1 THEN BEGIN
   WRITELN ('   Поле минимальной температуры '),
   WRITELN.('   Глубина  Темп-ра     Глубина  Темп-ра ',
            '   Глубина  Темп-ра     Глубина  Темп-ра'),
   WRITELN ('    (метр)  (гр  Ц)      (метр)  (гр  Ц) ',
            '    (метр)  (гр  Ц)      (метр)  (гр  Ц)');
   IF nomer=1 THEN BEGIN
   WRITELN (Fil2,'   Поле минимальной температуры '),
   WRITELN (Fil2,'   Глубина  Темп-ра     Глубина  Темп-ра ',
                 '   Глубина  Темп-ра     Глубина  Темп-ра'),
   WRITELN (Fil2,'    (метр)  (гр. Ц)      (метр)  (гр  Ц) ',
                 '    (метр)  (гр  Ц)      (метр)  (гр  Ц)'),
   END,
   WRITELN,
   IF nomer=1 THEN WRITELN(Fil2),
   FOR j:=1 TO nz DO BEGIN
       WRITE (' ',z[j] 9.3,'    ',tmin[j].5:1,' '),
       IF nomer=1 THEN  WRITE (Fil2,' ',z[j]:9 3,'    ',
          tmin[j] 5 1,' '),
       IF NOT(ODD(j)) THEN k =TRUNC(j/2) ELSE k:=1;
       IF (nomer=1) AND NOT((ODD(k))) THEN  WRITELN (Fil2),
       END;
   WRITELN;
   IF nomer=1 THEN WRITELN(Fil2);
   END,
sum4 =0,
FOR j:=2 TO nz DO BEGIN
    temp:=t[j],
    tz =tkr[ind[j]];
    IF temp>=0 THEN pr:=ct[ind[j]]*temp,
    IF (temp>=tz) AND (temp<0) THEN
       pr =(cm[ind[j]]+cdel[ind[j]])*temp;
    IF temp<=tz THEN pr:=cm[ind[j]]*temp+tz*cdel[ind[j]],
    pr =pr*hzs[j];
    sum4:=sum4+pr;
    END,
dtepl1 =sum4-sum5,
pogr1 =dtepl1-sum0;
otn1.=pogr1/(abs(dtepl1)+1),
sum5 =sum4,
sum0 =0,
```

```
    dtepl:=sum4-sum3,
    pogr:=dtepl-sum1;
    otn:=pogr/(abs(dtepl)+1)p
    WRITELN;
    WRITELN (' dtepl  =',dtepl,' pogr  =',pogr,
    ' pogr/(|dtepl|+1)   =',otn 7 2);
    WRITELN (' dtepl1 =',dtepl1,' pogr1 =',pogr1,
    ' pogr1/(|dtepl1|+1) =',otn1 7 2),
    IF nomer=1 THEN WRITELN (Fil2),
    IF nomer=1 THEN WRITELN (Fil2,' dtepl  =',dtepl,
    ' pogr  =',pogr,' pogr/(|dtepl|+1)   =',otn 7 2);
    IF nomer=1 THEN WRITELN (Fil2,' dtepl1 =',dtepl1,
    ' pogr1 =',pogr1,' pogr1/(|dtepl1|+1) =',otn1 7:2);
    tprom.=tprom+tprint;
    END,
    IF treal<tmax THEN GOTO met0,
    IF nomer=1 then CLOSE (Fil2),
END.
```

ПРИЛОЖЕНИЕ 2
Обязательное

ТЕКСТ ПРОГРАММЫ РЕШЕНИЯ ДВУМЕРНОЙ ЗАДАЧИ

```
main ()
{
#include <stdio h>
#include <math h>
#define  JN1 22
#define  IN1 22
#define  KZON 1
#define  PERIOD 365.25
#define  PI 3.1492
/*
        Используются следующие константы :
        ----------------------------------
JN1   - количество узловых (сеточных) точек по вертикали   + 1
IN1   - количество узловых (сеточных) точек по горизонтали + 1
KZON  - количество грунтовых слоев
        Например, для геологического разреза типа
                  песок сухой
                  торф
                  глина
                  песок влажный
        KZON  должен быть равен 4.
PERIOD - длина годового цикла в сутках
*/
FILE *fopen(),*fp1,*fp2;
char FILENAME1[14],FILENAME2[14],
float T[JN1][IN1];
float S[JN1][IN1];
float TMIN[JN1][IN1];
float Z[JN1];
float HZ[JN1];
float HZS[JN1];
float XLT1[JN1][IN1];
float XLM1[JN1][IN1];
float HX[IN1];
float HXS[IN1];
float XLT2[JN1][IN1];
float XLM2[JN1][IN1];
int   IND[JN1][IN1];
float CDEL[KZON];
float CT[KZON],
float CM[KZON];
float XLT[KZON];
float XLM[KZON],
float WNZM[KZON],
float RSK[KZON];
float TKR[KZON];
float WW[KZON];
float ALFA,ALFAL,ALFAZ,TGOD,TMAX,TPROM,TPRINT,DTIME,DT,
float TVSR,TVAM1,TVAM2,TPP,GAMA,SUM2,SUM4;
float ZNAM,TREAL,TMEC,TNACH,OMEGA1,OMEGA2,SUM1,SUM3,SUM0,
float TV,TEMP,TEMP1,TEMP2,TZ,PR,SUM5,TSEZ,PR1,PR2,PR3,PR4,
float XL1,XL2,XL3,XL4,VPR1,VPR2,VPR3,VPR4,C1,C2,C3,FI,DTC,
float DTEPL1,DTEPL,POGR,POGR1,OTN,OTN1;
```

```
int   NOMER,NZ,NX,I,I1,I2,J,K,
printf ("\n   Введите     0 - вывод только на экран     "),
printf ('\n                1 - одновременно в файл    \n'),
scanf  ("%d",&NOMER);
printf ("\n   Введите имя файла с набором данных     \n"),
scanf  ('%s",FILENAME1),
fp1=fopen(FILENAME1,"r");
if (NOMER==1)
   {
   printf ( \n   Введите имя файла для вывода     \n'),
   scanf  ('%s",FILENAME2),
   fp2=fopen(FILENAME2,"w+"),
   }
   else fp2=stdout
TVSR=0,
fscanf   (fp1,"%f%f%f%f%f%f",&TMAX,&TPROM,&TPRINT,&DTIME,
         &ALFAL,&ALFAZ),
fscanf   (fp1,"%f%f%f%f%f",&TNACH,&TVAM1,&TVAM2,&TPP,&GAMA),

fprintf (fp2,"\n                    ВХОДНАЯ  ИНФОРМАЦИЯ   \n"),
fprintf (fp2,"\n Обозначение                              Физический
          Единица    Принятое'),
fprintf (fp2,"\n в программе                                  смысл
         измерения    значение"),
fprintf (fp2,"\n        tmax                  Расчетный  период
             год  %10 2f",TMAX),
fprintf (fp2,"\n        tprom               Когда начать печать
             год  %10 2f',TPROM),
fprintf (fp2,'\n       tprint                    Частота печати
             месяц  %10 2f",TPRINT),
fprintf (fp2,'\n        dtime                    Шаг по времени
             час  %10 2f',DTIME),
fprintf (fp2,'\n        alfal      Коэффициент теплоотдачи летом
   ккал/(м^2*ч*град)  %10 2f",ALFAL),
fprintf (fp2,"\n        alfaz      Коэффициент теплоотдачи зимой
   ккал/(м^2*ч*град)  %10 2f",ALFAZ);
fprintf (fp2,'\n        tnach      Начальная температура грунта
             град Ц  %10 2f ,TNACH);
fprintf (fp2,'\n        tvam1   Минимальная температура воздуха
             град Ц  %10 2f',TVAM1);
fprintf (fp2,'\n        tvam2  Максимальная температура воздуха
             град Ц  %10 2f",TVAM2);
fprintf (fp2,'\n          tpp  ,Период с темпер-рой воздуха < 0
             месяц  %10 2f',TPP);
fprintf (fp2, \n        gama              Теплота плавления льда
            ккал/м^3  %10 2f',GAMA),
TGOD=PERIOD*24,
TMAX=TMAX*TGOD,
TPRINT=TPRINT*PERIOD*2,
TPROM=TPROM*TGOD+TPRINT,
TPP=TPP*PERIOD*2;
DT=DTIME*0 1,
NZ=JN1-1,
NX=IN1-1,
for (K=1,K<=KZON,K++)
    {
    fscanf (fp1,"%f%f%f%f%f%f%f%f ,&CM[K],&CT[K],&XLM[K],
    &XLT[K],&WW[K],&WN2M[K],&RSK[K],&TKR[K]),
```

```
    fprintf (fp2,stdout,"\n      cm[%2d]      Теплоемкость
    мерзлого грунта     ккал/(м^3*град)  %10 2f",K,CM[K]);
    fprintf (fp2,stdout,"\n      ct[%2d]        Теплоемкость
    талого грунта     ккал/(м^3*град)  %10.2f",K,CT[K]),
    fprintf (fp2,stdout,"\n     xlm[%2d]  Теплопроводность
    мерзлого грунта     ккал/(м*ч*град)  %10 2f',K,XLM[K]),
    fprintf (fp2,stdout,"\n     xlt[%2d]    Теплопроводность
    талого грунта     ккал/(м*ч*град)  %10 2f",K,XLT[K]);
    fprintf (fp2,stdout,"\n      ww[%2d]        Суммарная
    влажность грунта        доли единицы  %10 2f",K,WW[K]),
    fprintf (fp2,stdout,"\n    wnzm[%2d]       Количество
    незамерзшей воды        доли единицы  %10 2f",K,WNZM[K]);
    fprintf (fp2,stdout,"\n     rsk[%2d]       Объемный вес
    скелета грунта              кг/м^3  %10.2f",K,RSK[K]),
    fprintf (fp2,stdout,"\n     tkr[%2d]  Нижняя граница
    фазовых переходов              град Ц  %10.2f",K,TKR[K]),
    }
fprintf (fp2,"\n\n\n            Шаги по сетке
        (от поверхности к глубине) \n\n");
HZ[1]=0;
Z[1]=0,
for (J=2;J<=NZ;J++)
    {
    fscanf (fp1,"%f",&HZ[J]);
    fprintf (fp2,"     hz[%3d]=%6 3f",J,HZ[J]);
    if (fmod((J-1),4)==0) fprintf (fp2,"\n");
    Z[J]=Z[J-1]+HZ[J];
    }
HZ[JN1]=0,
fprintf (fp2,"\n\n\n            Шаги по сетке
        (по горизонтали) \n\n"),

HX[1]=0,
for (I=2;I<=NX;I++)
    {
    fscanf (fp1,"%f",&HX[I]);
    fprintf (fp2,"     hz[%3d]=%6 3f",I,HX[I]),
    if (fmod((I-1),4)==0) fprintf (fp2,"\n"),
    }
HX[IN1]=0;
for (J=0,J<=JN1,J++) for (I=0,I<=IN1;I++)  IND[J][I]=1;
BEG   fscanf (fp1,"%d",&K),
      if (K==0) goto FIN,
      fscanf (fp1,"%d%d%d",&J,&I1,&I2),
      for (I=I1;I<=I2,I++) IND[J][I]=K;
      goto BEG;
FIN ;
for (J=1,J<=NZ;J++)  for (I=1;I<=NX;I++)
    {
    XLT1[J][I]=0 5*(XLT[IND[J][I]]+XLT[IND[J+1][I]]);
    XLM1[J][I]=0 5*(XLM[IND[J][I]]+XLM[IND[J+1][I]]),
    XLT2[J][I]=0 5*(XLT[IND[J][I]]+XLT[IND[J][I+1]]),
    XLM2[J][I]=0 5*(XLM[IND[J][I]]+XLM[IND[J][I+1]]);
    }

fprintf (fp2,"\n\n  Условная схема геологического разреза
        грунта \n\n"),
if (NOMER==1)
```

```
   {
   }
for (J=1;J<=NZ,J++)
    {
    fprintf (fp2,"\n\r");
    for (I=1;I<=NX;I++)   fprintf (fp2,"%1d",IND[J][I]),
    }
for (K=1,K<=KZON;K++)
    CDEL[K]=GAMA*RSK[K]*(WNZM[K]-WW[K])/TKR[K],
for (J=0;J<=JN1;J++)  for (I=0;I<=IN1,I++)
    {
    T[J][I]=TNACH;
    S[J][I]=TNACH;
    TMIN[J][I]=TNACH;
    }
for (J=1,J<=NZ,J++)     HZS[J]=0.5*(HZ[J]+HZ[J+1]),
for (I=1,I<=NX,I++)     HXS[I]=0.5*(HX[I]+HX[I+1]);
OMEGA1=PI/TPP;
OMEGA2=PI/(TGOD-TPP);
SUM0=0,
SUM1=0;
SUM3=0;
for (J=2;J<=NZ;J++)      for (I=1;I<=NX,I++)
    {
    TEMP=T[J][I];
    TZ=TKR[IND[J][I]],
    if (TEMP>=0) PR=CT[IND[J][I]]*TEMP,
    if ((TEMP>=TZ) && (TEMP<0))
       PR=(CM[IND[J][I]]+CDEL[IND[J][I]])*TEMP,
    if (TEMP<=TZ) PR=CM[IND[J][I]]*TEMP+TZ*CDEL[IND[J][I]],
    PR=PR*HZS[J]*HXS[I],
    SUM3=SUM3+PR,
    }
SUM6=SUM3;
TSEZ=0;
TREAL=0,
METO: if (TREAL>=(DTIME-0.5*DT)) DT=DTIME,
TREAL=TREAL+0.5*DT,
TSEZ=TSEZ+0.5*DT,
if (TSEZ>TGOD) TSEZ=TSEZ-TGOD;
if (TSEZ<TPP) TV=TVSR+TVAM1*sin(OMEGA1*TSEZ),
else TV=TVSR+TVAM2*sin(OMEGA2*(TSEZ-TPP));
ALFA=ALFAL;
if (TV<0) ALFA=ALFA2,

for (I=1;I<=NX;I++)   S[0][I]=TV;
for (J=1;J<=NZ;J++)  for (I=1,I<=NX,I++)
    {
    TEMP=0.5*(T[J][I]+T[J+1][I]);
    TZ=0.5*(TKR[IND[J][I]]+TKR[IND[J+1][I]]),
    if (TEMP>=0) XL1=XLT1[J][I];
    if (TEMP<=TZ) XL1=XLM1[J][I],
    if ((TEMP>TZ) && (TEMP<0))
       XL1=XLT1[J][I]+(XLM1[J][I]-XLT1[J][I])*(TEMP/TZ),
    TEMP=0.5*(T[J][I]+T[J-1][I]),
    TZ=0.5*(TKR[IND[J][I]]+TKR[IND[J-1][I]]),
    if (TEMP>=0) XL2=XLT1[J-1][I];
    if (TEMP<=TZ) XL2=XLM1[J-1][I];
```

```
    if ((TEMP>TZ) && (TEMP<0))
       XL2=XLT1[J-1][I]+(XLM1[J-1][I]-XLT1[J-1][I])*(TEMP/TZ),
    TEMP=0 5*(T[J][I]+T[J][I+1]),
    TZ=0 5*(TKR[IND[J][I]]+TKR[IND[J][I+1]]);
    if (TEMP>=0) XL3=XLT2[J][I],
    if (TEMP<=TZ) XL3=XLM2[J][I];
    if ((TEMP>TZ) && (TEMP<0))
       XL3=XLT2[J][I]+(XLM2[J][I]-XLT2[J][I])*(TEMP/TZ);
    TEMP=0 5*(T[J][I]+T[J][I-1]);
    TZ=0 5*(TKR[IND[J][I]]+TKR[IND[J][I-1]]);
    if (TEMP>=0) XL4=XLT2[J][I-1],
    if (TEMP<=TZ) XL4=XLM2[J][I-1],
    if ((TEMP>TZ) && (TEMP<0))
       XL4=XLT2[J][I-1]+(XLM2[J][I-1]-XLT2[J][I-1])*(TEMP/TZ),
    TEMP=T[J][I],
    TZ=TKR[IND[J][I]],
    if (TEMP>=0) C1=CT[IND[J][I]],
    if (TEMP<=TZ) C1=CM[IND[J][I]],
    if ((TEMP>TZ) && (TEMP<0))
       C1=CM[IND[J][I]]+CDEL[IND[J][I]];
    DTC=0 5*DT,
    if (J<NZ) PR1=XL1/HZ[J+1],
    if (J==NZ) PR1=0,
    if (J==1) PR2=ALFA,
    if (J>1) PR2=XL2/HZ[J],
    VPR1=(DTC*PR1)/HZS[J];
    VPR2=(DTC*PR2)/HZS[J],
    if (I<NX) PR3=XL3/HX[I+1],
    if (I==NX) PR3=0,
    if (I==1) PR4=0,
    if (I>1) PR4=XL4/HX[I],
    VPR3=(DTC*PR3)/HXS[I],
    VPR4=(DTC*PR4)/HXS[I],
    FI=C1*TEMP+VPR1*(T[J+1][I]-TEMP)+VPR3*(T[J][I+1]-TEMP)+
       VPR2*S[J-1][I]+VPR4*S[J][I-1],
    TEMP1=FI/(C1+VPR2+VPR4),
    C2=C1,
    if ((TEMP>=0) && (TEMP1<0))
       C2=CM[IND[J][I]]+CDEL[IND[J][I]],
    if ((TEMP<=TZ) && (TEMP1>TZ)) C2=C1+CDEL[IND[J][I]],
    if ((TEMP>TZ) && (TEMP<0) && (TEMP1>0)) C2=CT[IND[J][I]],
    if ((TEMP>TZ) && (TEMP<0) && (TEMP1<TZ)) C2=CM[IND[J][I]],
    if ((TEMP<=TZ) && (TEMP1>TZ)) FI=FI+TZ*CDEL[IND[J][I]];
    if ((TEMP>TZ) && (TEMP<0) && (TEMP1<TZ))
       FI=FI-TZ*CDEL[IND[J][I]],
    ZNAM=C2+VPR2+VPR4,
    TEMP2=FI/ZNAM,
    C3=C2,
    if ((TEMP<=TZ) && (TEMP2>0)) C3=CT[IND[J][I]],
    if ((TEMP>=0) && (TEMP2<TZ)) C3=CM[IND[J][I]];
    if ((TEMP>=0) && (TEMP2<=TZ)) FI=FI-TZ*CDEL[IND[J][I]],
    ZNAM=C3+VPR2+VPR4,
     [J][I]=FI/ZNAM;
/*   F (J==1) S[J][I]=TV;    */
    }
TREAL=0 5*DT,
TSEZ=TSEZ+0 5*DT,
IF (TSEZ>TGOD) TSEZ=TSEZ-TGOD,
```

```
if (TSEZ<TPP) TV=TVSR+TVAM1*sin(OMEGA1*TSEZ),
else TV=TVSR+TVAM2*sin(OMEGA2*(TSEZ-TPP));
ALFA=ALFAL;
if (TV<0) ALFA=ALFAZ,
SUM2=0;
for (J=NZ;J>=1;J--)    for (I=NX;I>=1;I--)
    {
    TEMP=0.5*(S[J][I]+S[J+1][I]);
    TZ=0 5*(TKR[IND[J][I]]+TKR[IND[J+1][I]]),
    if (TEMP>=0) XL1=XLT1[J][I],
    if (TEMP<=TZ) XL1=XLM1[J][I];
    if ((TEMP>TZ) && (TEMP<0))
       XL1=XLT1[J][I]+(XLM1[J][I]-XLT1[J][I])*(TEMP/TZ);
    TEMP=0.5*(S[J][I]+S[J-1][I]);
    TZ=0 5*(TKR[IND[J][I]]+TKR[IND[J-1][I]]);
    if (TEMP>=0) XL2=XLT1[J-1][I],
    if (TEMP<=TZ) XL2=XLM1[J-1][I],
    if ((TEMP>TZ) && (TEMP<0))
       XL2=XLT1[J-1][I]+(XLM1[J-1][I]-XLT1[J-1][I])*(TEMP/TZ);
    TEMP=0 5*(S[J][I]+S[J][I+1]);
    TZ=0 5*(TKR[IND[J][I]]+TKR[IND[J][I+1]]);
    if (TEMP>=0) XL3=XLT2[J][I],
    if (TEMP<=TZ) XL3=XLM2[J][I];
    if ((TEMP>TZ) && (TEMP<0))
       XL3=XLT2[J][I]+(XLM2[J][I]-XLT2[J][I])*(TEMP/TZ),
    TEMP=0 5*(S[J][I]+S[J][I-1]);
    TZ=0 5*(TKR[IND[J][I]]+TKR[IND[J][I-1]]),
    if (TEMP>=0) XL4=XLT2[J][I-1],
    if (TEMP<=TZ) XL4=XLM2[J][I-1],
    if ((TEMP>TZ) && (TEMP<0))
       XL4=XLT2[J][I-1]+(XLM2[J][I-1]-XLT2[J][I-1])*(TEMP/TZ);
    TEMP=S[J][I],
    TZ=TKR[IND[J][I]];
    if (TEMP>=0) C1=CT[IND[J][I]],
    if (TEMP<=TZ) C1=CM[IND[J][I]];
    if ((TEMP>TZ) && (TEMP<0))
       C1=CM[IND[J][I]]+CDEL[IND[J][I]];
    DTC=0 5*DT,
    if (J<NZ) PR1=XL1/HZ[J+1],
    if (J==NZ) PR1=0;
    if (J==1) PR2=ALFA;
    if (J>1) PR2=XL2/HZ[J];
    VPR1=(DTC*PR1)/HZS[J];
    VPR2=(DTC*PR2)/HZS[J],
    if (I<NX) PR3=XL3/HX[I+1];
    if (I==NX) PR3=0,
    if (I==1) PR4=0,
    if (I>1) PR4=XL4/HX[I],
    VPR3=(DTC*PR3)/HXS[I];
    VPR4=(DTC*PR4)/HXS[I];
    FI=C1*TEMP+VPR2*(S[J-1][I]-TEMP)+VPR4*(S[J][I-1]-TEMP)+
       VPR1*T[J+1][I]+VPR3*T[J][I+1],
    TEMP1=FI/(C1+VPR1+VPR3),
    C2=C1,
    if ((TEMP>=0) && (TEMP1<0))
       C2=CM[IND[J][I]]+CDEL[IND[J][I]],
    if ((TEMP<=TZ) && (TEMP1>TZ)) C2=C1+CDEL[IND[J][I]],
    if ((TEMP>TZ) && (TEMP<0) && (TEMP1>0)) C2=CT[IND[J][I]],
```

```
    if ((TEMP>TZ) && (TEMP<0) && (TEMP1<TZ)) C2=CM[IND[J][I]],
    if ((TEMP<=TZ) && (TEMP1>TZ)) FI=FI+TZ*CDEL[IND[J][I]];
    if ((TEMP>TZ) && (TEMP<0) && (TEMP1<TZ))
       FI=FI-TZ*CDEL[IND[J][I]],
    ZNAM=C2+VPR1+VPR3;
    TEMP2=FI/ZNAM,
    C3=C2,
    if ((TEMP<=TZ) && (TEMP2>0)) C3=CT[IND[J][I]],
    if ((TEMP>=0) && (TEMP2<TZ)) C3=CM[IND[J][I]];
    if ((TEMP>=0) && (TEMP2<=TZ)) FI=FI-TZ*CDEL[IND[J][I]],
    ZNAM=C3+VPR1+VPR3;
    if (J==1) SUM2=SUM2+(TEMP-S[J+1][I])*PR1*HXS[I];
    T[J][I]=FI/ZNAM,
    /*  if (J==1) T[J][I]=TV;*/
    }
for (I=1,I<=NX,I++)   T[0][I]=TV,
SUM2=SUM2*DT,
SUM0=SUM0+SUM2,
SUM1=SUM1+SUM2,
if (TREAL>=(TPROM-0 5*DT))
   {
fprintf (fp2,"\n%f",TREAL),
   TMEC=TREAL/(TGOD/12),
   fprintf (fp2,"\n    Время (месяц) = %8 1f",TMEC);
   fprintf (fp2,"\n    Поле температуры ");
   for (J=1,J<=NZ,J++)
       {
       fprintf (fp2,"\n\r"),
       for (I=1,I<=NX;I++)
           fprintf (fp2,"%5 1f",T[J][I]);
       }
   SUM4=0,
   for (J=2;J<=NZ,J++)    for (I=1,I<=NX,I++)
       {
       TEMP=T[J][I],
       TZ=TKR[IND[J][I]],
       if (TEMP>=0) PR=CT[IND[J][I]]*TEMP,
       if ((TEMP>=TZ) && (TEMP<0))
          PR=(CM[IND[J][I]]+CDEL[IND[J][I]])*TEMP,
       if (TEMP<=TZ) PR=CM[IND[J][I]]*TEMP+TZ*CDEL[IND[J][I]],
       PR=PR*HZS[J]*HXS[I];
       SUM4=SUM4+PR;
       }
   DTEPL1=SUM4-SUM5,
   POGR1=DTEPL1-SUM0,
   OTN1=POGR1/(fabs(DTEPL1)+1);
   SUM5=SUM4,
   SUM0=0;
   DTEPL=SUM4-SUM3,
   POGR=DTEPL-SUM1;
   OTN=POGR/(fabs(DTEPL)+1),
   fprintf (fp2,"\n   pogr/(|dtepl|+1)      = %7.2f",OTN),
   fprintf (fp2,"\n   pogr1/(|dtepl1|+1)    = %7 2f",OTN1),
   TPROM=TPROM+TPRINT,
   }
if (TREAL<TMAX) goto METO;
if (NOMER==1) fclose(fp2),
}
```

ПРИЛОЖЕНИЕ 3
Рекомендуемое

ПРИМЕР РАСЧЕТА ТЕМПЕРАТУРНОГО РЕЖИМА ГРУНТА

ВХОДНАЯ ИНФОРМАЦИЯ

Физический смысл	Единица измерения	Принятое значение
Расчетный период	год	6 00
Шаг по времени	час	73 05
Коэффициент теплоотдачи летом	ккал/(м^2*ч*град)	20 00
Коэффициент теплоотдачи зимой	ккал/(м^2*ч*град)	1 00
Начальная температура грунта	град Ц	1 54
Минимальная температура воздуха	град Ц	-17.04
Максимальная температура воздуха	град Ц	19 16
Период с темпер-рой воздуха < 0	месяц	5 55
Осенняя дата перехода через 0	месяц	10 20
Теплота плавления льда	ккал/м^3	80 00
Тип грунта -	Песок	
Теплоемкость мерзлой породы	ккал/(м^3*град)	485 00
Теплоемкость талой породы	ккал/(м^3*град)	575 00
Теплопроводность мерзлой породы	ккал/(м*ч*град)	1 90
Теплопроводность талой породы	ккал/(м*ч*град)	1 70
Суммарная влажность грунта	доли единицы	0 10
Количество незамерзшей воды	доли единицы	0 00
Объемный вес скелета грунта	кг/м^3	1800 00
Нижняя граница фазовых переходов	град Ц	-0 01
Тип грунта	Суглинок	
Теплоемкость мерзлой породы	ккал/(м^3*град)	510 00
Теплоемкость талой породы	ккал/(м^3*град)	670 00
Теплопроводность мерзлой породы	ккал/(м*ч*град)	1 30
Теплопроводность талой породы	ккал/(м*ч*град)	1 15
Суммарная влажность грунта	доли единицы	0 20
Количество незамерзшей воды	доли единицы	0 00
Объемный вес скелета грунта	кг/м^3	1600 00
Нижняя граница фазовых переходов	град Ц	-0 20

6 - й год
Месяц - Январь
Поле температуры

Глуб (метр)	Темп-ра (гр. Ц)	Глуб. (метр)	Темп-ра (гр. Ц)	Глуб. (метр)	Темп-ра (гр Ц)	Глуб (метр)	Темп-ра (гр Ц)
0 00	-3.2	0.50	-0.0	1 00	1.2	1 50	2 2
2.00	3.1	2 50	3 8	3 00	4 4	3 50	4 9
4 00	5 1	4 50	5 1	5 00	5 0	5 50	4 9
6 00	4 7	6 50	4 5	7 00	4 3	7 50	4 1
8 00	3.9	8 50	3 8	9.00	3 8	9 50	3 4
10 00	3 3	10 50	3 2	11 00	3 1	11 50	3 0
12.00	2 9	12.50	2.8	13 00	2 8	13 50	-
14.00	2 7	14 50	2 6	15 00	2 6	15 50	-
16 00	2 5	16 50	2 4	17 00	2 4	17 50	-
18 00	2 3	18 50	2 3	19 00	2 2	19 50	-
20 00	2 2	20 50	2 1	21 00	2 1	21 50	2 1

22 00	2 1	22 50	2 0	23 00	2 0	23 50	2 0
24 00	2 0	24 50	2 0	25 00	1 9	25 50	1 9
26 00	1 9	26 50	1 9	27 00	1 9	27 50	1 9
28 00	1 9	28 50	1 9	29 00	1 9	29 50	1 9

6 - й год
Месяц - Февраль
Поле температуры

Глуб (метр)	Темп-ра (гр Ц)	Глуб. (метр)	Темп-ра (гр Ц)	Глуб (метр)	Темп-ра (гр Ц)	Глуб (метр)	Темп-ра (гр Ц)
0 00	-5 1	0 50	-2 3	1 00	-0 0	1 50	1 1
2 00	1 9	2 50	2 6	3 00	3 2	3 50	3 8
4 00	4 2	4 50	4 4	5 00	4 5	5 50	4 5
6 00	4 4	6 50	4 4	7 00	4 2	7 50	4 1
8 00	4.0	8 50	3 8	9 00	3 7	9 50	3 5
10 00	3 4	10 50	3 3	11 00	3 2	11 50	3 1
12 00	3.0	12 50	2 9	13 00	2 8	13 50	2 8
14 00	2 7	14 50	2 6	15 00	2 6	15 50	2 5
16 00	2 5	16 50	2.5	17 00	2 4	17 50	2 4
18 00	2 3	18 50	2 3	19 00	2 3	19.50	2 2
20 00	2 2	20 50	2 2	21 00	2 1	21.50	2 1
22 00	2 1	22 50	2 1	23 00	2 0	23 50	2 0
24 00	2 0	24 50	2 0	25 00	2 0	25 50	1 9
26 00	1 9	26 50	1 9	27.00	1.9	27 50	1 9
28 00	1 9	28 50	1.9	29 00	1 9	29 50	1 9

6 - й год
Месяц - Март
Поле температуры

Глуб. (метр)	Темп-ра (гр Ц)	Глуб (метр)	Темп-ра (гр Ц)	Глуб (метр)	Темп-ра (гр. Ц)	Глуб (метр)	Темп-ра (гр. Ц)
0 00	-4.7	0 50	-2.4	1 00	-0.0	1 50	0.6
2 00	1 2	2 50	1 8	3 00	2 4	3 50	3 0
4 00	3 4	4.50	3.8	5 00	4 0	5 50	4 1
6 00	4 1	6.50	4.1	7.00	4.1	7.50	4 0
8.00	3 9	8 50	3.8	9.00	3.7	9 50	3 6
10.00	3 5	10 50	3.4	11 00	3 2	11 50	3.1
12.00	3.1	12 50	3.0	13.00	2 9	13.50	2 8
14 00	2 7	14.50	2.7	15.00	2.6	15 50	2.6
16 00	2.5	16.50	2.5	17 00	2 4	17.50	2 4
18 00	2 3	18 50	2 3	19.00	2.3	19 50	2 2
20 00	2 2	20 50	2 2	21 00	2.1	21 50	2 1
22 00	2.1	22.50	2.1	23.00	2 0	23 50	2 0
24 00	2 0	24 50	2 0	25.00	2.0	25 50	1 9
26 00	1 9	26 50	1 9	27.00	1.9	27 50	1 9
28.00	1 9	28 50	1.9	29 00	1.9	29 50	1 9

6 - й год
Месяц - Апрель
Поле температуры

Глуб (метр)	Темп-ра (гр Ц)	Глуб (метр)	Темп-ра (гр Ц)	Глуб. (метр)	Темп-ра (гр. Ц)	Глуб (метр)	Темп-ра (гр Ц)
0 00	-2 8	0 50	-2 0	1 00	-1 0	1 50	-0 0
2 00	0 6	2 50	1 1	3 00	1 7	3 50	2 3
4 00	2 8	4 50	3.2	5 00	3.5	5 50	3 7

6.00	3.8	6.50	3.8	7.00	3 8	7 50	3.8
8 00	3.8	8 50	3.7	9.00	3 6	9 50	3 5
10.00	3 5	10 50	3 4	11 00	3 3	11 50	3 2
12 00	3.1	12.50	3 0	13.00	2 9	13 50	2 9
14 00	2 8	14 50	2 7	15 00	2 7	15 50	2 6
16 00	2 5	16 50	2.5	17 00	2 5	17 50	2 4
18.00	2 4	18 50	2.3	19.00	2 3	19.50	2 3
20 00	2 2	20 50	2.2	21.00	2 2	21 50	2 1
22.00	2 1	22.50	2 1	23.00	2 1	23 50	2.0
24.00	2 0	24 50	2 0	25 00	2 0	25 50	2 0
26.00	1.9	26.50	1 9	27.00	1 9	27 50	1 9
28.00	1.9	28.50	1 9	29.00	1.9	29 50	1 9

6 - й год
Месяц - Май
Поле температуры

Глуб (метр)	Темп-ра (гр Ц)	Глуб. (метр)	Темп-ра (гр Ц)	Глуб. (метр)	Темп-ра (гр Ц)	Глуб (метр)	Темп-ра (гр. Ц)
0.00	3.2	0 50	-0 0	1 00	-0 0	1 50	-0 0
2 00	0 4	2 50	0 9	3 00	1.3	3 50	1 9
4 00	2.4	4.50	2.8	5 00	3 1	5 50	3.3
6.00	3 4	6 50	3.6	7 00	3.6	7.50	3 6
8 00	3.6	8.50	3.6	9 00	3 5	9 50	3 5
10.00	3 4	10 50	3 3	11 00	3.3	11 50	3 2
12 00	3 1	12.50	3 0	13 00	3 0	13.50	2 9
14 00	2.8	14.50	2 8	15 00	2 7	15 50	2 6
16 00	2.6	16 50	2 5	17 00	2 5	17 50	2 4
18 00	2.4	18 50	2.3	19 00	2 3	19 50	2 3
20 00	2 2	20.50	2 2	21.00	2 2	21 50	2.1
22.00	2 1	22 50	2 1	23.00	2 1	23.50	2.0
24 00	2 0	24 50	2.0	25.00	2 0	25.50	2 0
26 00	2 0	26 50	2 0	27.00	1 9	27.50	1.9
28.00	1.9	28 50	1.9	29.00	1 9	29.50	1.9

6 - й год
Месяц - Июнь
Поле температуры

Глуб. (метр)	Темп-ра (гр. Ц)	Глуб (метр)	Темп-ра (гр. Ц)	Глуб. (метр)	Темп-ра (гр Ц)	Глуб (метр)	Темп-ра (гр. Ц)
0 00	11.2	0.50	5.5	1 00	-0.0	1 50	0.3
2.00	0 5	2 50	0.8	3.00	1 2	3.50	1 6
4 00	2.1	4.50	2.4	5.00	2.8	5 50	3 0
6 00	3 1	6.50	3.2	7 00	3.3	7 50	3.4
8 00	3 4	8 50	3.4	9 00	3.4	9.50	3 4
10 00	3 3	10 50	3 3	11 00	3 2	11 50	3 2
12.00	3.1	12 50	3 0	13.00	3 0	13.50	2 8
14.00	2 8	14 50	2 8	15 00	2 7	15 50	2 7
16 00	2.6	16.50	2 6	17.00	2.5	17 50	2.5
18 00	2.4	18.50	2.4	19.00	2.3	19 50	2 3
20.00	2 3	20 50	2 2	21 00	2 2	21 50	2 2
22 00	2 1	22 50	2.1	23 00	2 1	23.50	2 1
24 00	2.0	24.50	2.0	25 00	2 0	25 50	2.0
26 00	2 0	26.50	2 0	27 00	2 0	27 50	1 9
26.00	1.9	28 50	1 9	29.00	1.9	29.50	1 9

6 - й год
Месяц - Июль
Поле температуры

Глуб. (метр)	Темп-ра (гр Ц)	Глуб (метр)	Темп-ра (гр Ц)	Глуб (метр)	Темп-ра (гр Ц)	Глуб (метр)	Темп-ра (гр Ц)
0 00	17 2	0 50	13.4	1 00	10 1	1 50	7 5
2 00	5 6	2 50	4.2	3.00	3 2	3 50	2 8
4 00	2.4	4 50	2 4	5 00	2 6	5 50	2 8
6 00	2.9	6.50	3 0	7.00	3 1	7 50	3 2
8 00	3 2	8.50	3 2	9 00	3 3	9.50	3.3
10 00	3 2	10 50	3.2	11 00	3 2	11 50	3.1
12 00	3 1	12 50	3 0	13 00	3 0	13.50	2 9
14 00	2 9	14 50	2 8	15 00	2.7	15 50	2 7
16.00	2 6	16 50	2 6	17 00	2 5	17 50	2 5
18 00	2.4	18 50	2 4	19 00	2 3	19 50	2 3
20 00	2.3	20 50	2.2	21 00	2.2	21.50	2 2
22 00	2 1	22 50	2 1	23 00	2 1	23.50	2 1
24 00	2.1	24 50	2 0	25 00	2.0	25.50	2.0
26 00	2 0	26 50	2 0	27 00	2 0	27.50	2 0
28 00	2 0	28.50	1 9	29 00	1.9	29.50	1 9

6 - й год
Месяц - Август
Поле температуры

Глуб (метр)	Темп-ра (гр Ц)	Глуб (метр)	Темп-ра (гр. Ц)	Глуб (метр)	Темп-ра (гр. Ц)	Глуб (метр)	Темп-ра (гр Ц)
0 00	18.7	0 50	16 1	1 00	13.6	1 50	11 4
2 00	9 5	2 50	7 8	3 00	6 3	3 50	4 9
4 00	4 0	4 50	3 5	5.00	3.1	5 50	3.0
6.00	3 0	6 50	3 0	7.00	3 0	7 50	3 1
8.00	3.1	8 50	3 1	9 00	3 1	9.50	3.1
10.00	3 1	10 50	3 1	11 00	3.1	11 50	3 1
12 00	3 0	12 50	3.0	13.00	3 0	13.50	2 9
14.00	2 9	14 50	2 8	15 00	2 7	15 50	2.7
16 00	2 6	16.50	2 6	17 00	2.5	17 50	2 5
18 00	2 4	18.50	2 4	19 00	2 4	19 50	2 3
20 00	2 3	20 50	2 3	21 00	2 2	21.50	2 2
22 00	2 2	22 50	2 1	23 00	2 1	23 50	2 1
24 00	2.1	24 50	2 1	25 00	2 0	25.50	2 0
26 00	2 0	26 50	2 0	27 00	2 0	27 50	2 0
28 00	2 0	28 50	2 0	29 00	2.0	29.50	2 0

6 - й год
Месяц - Сентябрь
Поле температуры

Глуб (метр)	Темп-ра (гр Ц)	Глуб. (метр)	Темп-ра (гр Ц)	Глуб. (метр)	Темп-ра (гр. Ц)	Глуб (метр)	Темп-ра (гр Ц)
0 00	15 8	0 50	15 0	1.00	13.8	1 50	12.5
2 00	11 1	2 50	9 8	3 00	8 3	3 50	6 9
4 00	5 7	4 50	4 8	5.00	4 1	5 50	3 7
6 00	3 5	6 50	3 3	7 00	3 2	7 50	3 2
8 00	3 1	8 50	3 1	9 00	3 1	9.50	3 1
10 00	3 1	10 50	3 1	11 00	3 1	11 50	3 0
12 00	3 0	12 50	3.0	13 00	2 9	13 50	2 9
14 00	2 8	14 50	2 8	15 00	2 7	15 50	2 7

16 00	2 6	16 50	2 6	17 00	2 6	17 50	2 5
18 00	2 5	18 50	2 4	19 00	2 4	19 50	2 3
20 00	2 3	20 50	2 3	21 00	2 2	21 50	2 2
22 00	2 2	22 50	2 2	23 00	2 1	23 50	2 1
24 00	2 1	24 50	2 1	25 00	2 1	25 50	2 0
26 00	2 0	26 50	2 0	27 00	2 0	27 50	2 0
28 00	2 0	28 50	2 0	29 00	2 0	29 50	2 0

6 - й год
Месяц - Октябрь
Поле температуры

Глуб (метр)	Темп-ра (гр Ц)	Глуб (метр)	Темп-ра (гр Ц)	Глуб (метр)	Темп-ра (гр Ц)	Глуб (метр)	Темп-ра (гр Ц)
0 00	9 3	0 50	10.4	1 00	10 8	1 50	10 8
2 00	10 4	2 50	9 7	3 00	8 9	3 50	7 8
4 00	6 7	4 50	5 8	5 00	5 0	5 50	4 5
6 00	4 1	6 50	3 9	7 00	3 6	7 50	3 5
8 00	3 4	8 50	3 3	9 00	3 2	9 50	3 1
10 00	3.1	10 50	3.1	11 00	3 0	11 50	3 0
12 00	3 0	12 50	2 9	13 00	2 9	13 50	2 9
14 00	2 8	14.50	2 8	15 00	2 7	15 50	2 7
16 00	2 7	16 50	2 6	17 00	2 6	17 50	2 5
18 00	2 5	18 50	2 4	19 00	2 4	19 50	2 4
20 00	2 3	20.50	2 3	21 00	2 3	21 50	2 2
22 00	2 2	22 50	2 2	23 00	2 1	23 50	2 1
24 00	2 1	24 50	2 1	25 00	2 1	25 50	2 0
26 00	2 0	26 50	2 0	27 00	2 0	27 50	2 0
28 00	2 0	28 50	2 0	29 00	2 0	29 50	2 0

6 - й год
Месяц - Ноябрь
Поле температуры

Глуб (метр)	Темп-ра (гр Ц)	Глуб (метр)	Темп-ра (гр Ц)	Глуб (метр)	Темп-ра (гр Ц)	Глуб (метр)	Темп-ра (гр Ц)
0.00	0 8	0.50	3 5	1 00	5 5	1 50	6 8
2 00	7 5	2 50	7 8	3 00	7 8	3 50	7 4
4 00	6 8	4.50	6 2	5 00	5 5	5 50	5 0
6 00	4.7	6 50	4 3	7 00	4 1	7 50	3 8
8 00	3 7	8 50	3 5	9.00	3 4	9 50	3 3
10 00	3 2	10 50	3 1	11 00	3 1	11 50	3 0
12 00	3 0	12 50	2 9	13 00	2 9	13 50	2 9
14 00	2 8	14 50	2 8	15 00	2 7	15 50	2 7
16 00	2 6	16 50	2 6	17 00	2 6	17 50	2 5
18 00	2 5	18 50	2 4	19 00	2 4	19 50	2 4
20 00	2 3	20 50	2 3	21 00	2 3	21 50	2 2
22 00	2 2	22 50	2 2	23 00	2 2	23 50	2 1
24.00	2 1	24 50	2 1	25 00	2 1	25 50	2 1
26 00	2.0	26 50	2 0	27 00	2 0	27 50	2 0
28.00	2 0	28 50	2 0	29 00	2 0	29 50	2 0

6 - й год
Месяц - Декабрь
Поле температуры

Глуб. (метр)	Темп-ра (гр Ц)	Глуб (метр)	Темп-ра (гр Ц)	Глуб (метр)	Темп ра (гр Ц)	Глуб (метр)	Темп (((гр

0 00	-0 0	0 50	1 5	1 00	3 0	1 50	4 1
2 00	4 9	2 50	5 5	3 00	5 9	3 50	6 1
4 00	6.0	4.50	5.7	5.00	5.4	5 50	5 0
6 00	4 8	6 50	4 5	7 00	4 2	7 50	4 0
8.00	3.8	8 50	3 6	9 00	3 4	9 50	3 3
10 00	3 2	10 50	3.1	11 00	3 0	11 50	2 9
12.00	2 8	12 50	2.8	13 00	2 7	13 50	2 7
14 00	2 6	14 50	2 6	15 00	2 5	15 50	2 5
16 00	2 5	16.50	2.4	17 00	2 4	17 50	2 3
18 00	2 3	18 50	2 3	19 00	2.2	19 50	2 2
20.00	2 2	20 50	2.1	21.00	2 1	21.50	2 1
22.00	2 0	22 50	2 0	23.00	2.0	23.50	2.0
24 00	2.0	24 50	1 9	25 00	1.9	25.50	1 9
26 00	1 9	26.50	1 9	27 00	1.9	27 50	1.9
28.00	1.9	28.50	1.8	29.00	1.8	29.50	1 8

Поле минимальной температуры

0.00	-5.1	0.50	-2.4	1.00	-1.0	1 50	-0 0
2.00	0.4	2.50	0.8	3 00	1 2	3.50	1.6
4.00	2 1	4.50	2.4	5.00	2.6	5.50	2 8
6.00	2 9	6.50	3.0	7.00	3.0	7.50	3 1
8.00	3 1	8.50	3.1	9.00	3.1	9 50	3 1
10 00	3 1	10 50	3.1	11.00	3 0	11 50	2 9
12 00	2 8	12.50	2.8	13.00	2.7	13.50	2 7
14 00	2.6	14 50	2.6	15 00	2.5	15.50	2 5
16 00	2.5	16.50	2.4	17.00	2.4	17 50	2 3
18 00	2.3	18 50	2.3	19 00	2 2	19.50	2 2
20.00	2.2	20 50	2.1	21 00	2.1	21 50	2 1
22.00	2.0	22.50	2.0	23 00	2 0	23 50	2 0
24.00	2 0	24 50	1.9	25.00	1.9	25.50	1 9
26 00	1 9	26.50	1.9	27 00	1.9	27 50	1 9
28 00	1.9	28.50	1 8	29.00	1.8	29 50	1.8

Глубина промерзания = 1 50

Поле максимальной температуры

0 00	18 7	0 50	16.1	1 00	13.8	1.50	12 5
2 00	11.1	2 50	9.8	3.00	8.9	3 50	7.8
4 00	6 8	4.50	6 2	5.00	5.5	5 50	5.0
6.00	4 8	6.50	4.5	7.00	4 3	7.50	4.1
8 00	4 0	8 50	3 8	9 00	3 7	9.50	3 6
10.00	3.5	10.50	3.4	11.00	3.3	11.50	3 2
12.00	3.1	12.50	3.0	13 00	3.0	13 50	2 9
14.00	2.9	14.50	2.8	15.00	2.7	15 50	2 7
16 00	2.7	16.50	2.6	17 00	2.6	17.50	2.5
18 00	2.5	18.50	2.4	19.00	2.4	19.50	2.4
20.00	2 3	20 50	2.3	21.00	2.3	21.50	2.2
22.00	2.2	22 50	2.2	23.00	2 2	23.50	2 1
24 00	2 1	24.50	2.1	25 00	2.1	25 50	2.1
26 00	2.0	26 50	2.0	27.00	2.0	27.50	2 0
28 00	2 0	28.50	2 0	29 00	2 0	29 50	2 0

СОДЕРЖАНИЕ

I. Общие положения..... 3
2. Численный метод расчета. Вывод и обоснование..... 4
2.I. Постановка задачи..... 4
2.2. Вывод уравнения..... 5
2.3. Некоторые замечания..... 6
2.4. Способ решения..... 7
2.5. Схема решения одномерной задачи..... 7
2.6. Схема решения двумерной задачи..... 9
2.7. Контроль точности решения..... II
2.8. Поверхностные условия..... I2
2.9. Замечания по реализации..... I3
3. Приближенный метод расчета температурного режима грунта. I3
3.I. Общее описание..... I3
3.2. Безразмерные параметры и переменные..... I5
3.3. Изменение температуры воздуха I6
3.4. Вычисление значений температур..... I7
3.5. Определение глубины промерзания..... 20
3.6. Определение минимальных температур..... 22
Приложение I. Текст программы решения одномерной задачи. .24
Приложение 2. Текст программы решения двумерной задачи. . 33
Приложение 3. Пример расчета температурного режима грунта. 40

Руководящий документ

Инструкция по определению температурного режима вечномерзлых и сезонномерзлых грунтов и прогнозированию последствий изменения тепловых условий на поверхности

РД 39-Р-088-91

Отв. за выпуск Л.Н.Фефелова

Подписано в печать 29.05.91 г. Формат бумаги 60x84/16.
Объем 2 уч.-изд.л. Тираж 100 экз. Заказ № 1318.

Ротапринт Гипротюменнефтегаза
625000, г.Тюмень, ул.Республики, 62

gost.e-ecolog.ru